9

Refactoring als Modelltransformation

Nichts auf der Welt ist so kraftvoll
wie eine Idee deren Zeit gekommen ist.
Victor Hugo

Refactoring bedeutet Anwendung *systematischer und beherrschbarer Transformationsregeln* zur *Verbesserung des Systementwurfs* unter *Beibehaltung des extern beobachtbaren Verhaltens*. In diesem Kapitel werden zunächst eine Methodik zur Anwendung von Refactoring-Regeln und die Konzepte der *Modelltransformationen* diskutiert. Auf dieser Grundlage wird ein in der Praxis verwendbarer *Beobachtungsbegriff* entwickelt, der auf UML/P-Testfällen beruht. Einige Sammlungen von Refactoring-Regeln für die UML/P werden drauf aufbauend im nächsten Kapitel besprochen.

B.Rumpe, *Agile Modellierung mit UML*, 2. Aufl., Xpert.press
DOI 10.1007/978-3-642-22430-0_9, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

Die Anforderungen an ein im Einsatz befindliches Softwaresystem ändern sich mit dem Geschäftsmodell genauso wie mit den steigenden Ansprüchen der Anwender an die Softwarefunktionalität. Die technologische Basis einer Anwendung, wie das zugrundeliegende Betriebssystem, benutzte Frameworks oder Nachbarsysteme, unterliegen ständiger Evolution.

Während eines Projekts entstehen neue Anforderungen der Anwender, die flexibel in das Projekt einzubringen sind. Zusätzlich dazu ist die Komplexität heutiger Software meistens so hoch, dass eine allen Anforderungen gewachsene Architektur des Systems nicht von Anfang an entwickelt werden kann.

Aus diesen Gründen ist es notwendig, Techniken zu beherrschen, mit denen Software weiterentwickelt sowie den geänderten Anforderungen und einem neuen technischen Umfeld angepasst werden kann. Eine dafür verwendbare Technik ist das *Refactoring* vorhandener Software [Fow99, Opd92], das aus einer Sammlung von zielgerichteten und systematisch anwendbaren Transformationen besteht, mit denen eine konsequente Verbesserung einer Systemarchitektur vorgenommen werden kann. Diese Verbesserung dient anschließend als Grundlage für Erweiterungen des Systems.

Refactoring-Techniken [MT04] erfreuen sich zunehmender Beliebtheit. Deswegen gibt es mittlerweile Anpassungen für spezielle Sprachen, wie etwa Ruby [FHFB09], HTML [Har08] oder die UML [SPTJ01, Dob10], die Anwendung auf große und komplexe Softwaresysteme [RL04, Mar09], Refactoring für die Einführung von Entwurfsmustern [Ker04] oder für bestimmte Aufgaben der Softwareentwicklung, wie etwa die Software-Sanierung [Küb09].

Ziel dieses Kapitels ist zunächst die Demonstration einer methodischen Vorgehensweise anhand von Beispielen. Darauf aufbauend steht die Einbettung von Refactoring-Techniken in die Welt der Modelltransformationen im Vordergrund. Zunächst werden in Abschnitt 9.1 einige Beispiele verschiedener Arten von Refactoring-Anwendungen vorgestellt. Abschnitt 9.2 enthält eine methodische Einordnung der Refactoring-Techniken in den Softwareentwicklungsprozess. In Abschnitt 9.3 werden die Konzepte der Modelltransformationen, von denen Refactoring einen Spezialfall darstellt, erläutert. Dabei wird die Semantik von Transformationsregeln präzisiert und eine für die in [Rum11] vorgestellte Vorgehensweise geeigneter Beobachtungsbegriff definiert.

9.1 Einführende Beispiele für Transformationen

Dieser Abschnitt demonstriert anhand einiger Beispiele welche Arten von Refactoring-Schritten es gibt. Wie bereits in [Fow99] diskutiert, kann anhand kleinster Beispiele zwar das Prinzip, nicht aber die Motivation für Refactoring demonstriert werden. [Fow99] nutzt deshalb ein größeres Beispiel von 50 Seiten, um zu zeigen, dass mit Refactoring-Techniken Komplexität

in der Evolution beherrschbar wird. Mit den nachfolgenden kleinen Beispielen wird deshalb weniger die Notwendigkeit des Einsatzes von Refactoring motiviert, sondern die Einsatzmöglichkeiten beschrieben.

In Abbildung 9.1 ist eine für die nachfolgenden Beispiele ausreichende Begriffsdefinition aus der Literatur angegeben.[1] In Abbildung 10.2 wird darauf aufbauend eine detaillierte Begriffsdefinition vorgenommen.

Definitionen des Begriffs „Refactoring" aus der Literatur:

- „*Refactoring*" lässt sich als Operation zur Restrukturierung eines Programms charakterisieren, die den Entwurf, die Evolution und die Wiederverwendung objektorientierter Frameworks unterstützt. [Opd92, S. iii]

Das zum Thema Refactoring am meisten zitierte Werk [Fow99] bietet in der deutschen Übersetzung [Fow00] folgende Definitionen:

- „*Refaktorisierung* (Substantiv): Eine Änderung an der internen Struktur einer Software, um sie leichter verständlich zu machen und einfacher zu verändern, ohne ihr beobachtetes Verhalten zu ändern." [Fow00, S. 41]
- „*Refaktorisieren* (Verb): Eine Software umstrukturieren, ohne ihr beobachtbares Verhalten zu ändern, indem man eine Reihe von Refaktorisierungen anwendet." [Fow00, S. 41]

Abbildung 9.1. Begriffsdefinitionen für das „Refactoring"

In [Opd92] werden Refactoring-Schritte auch als Pläne zur Reorganisation von Software bezeichnet, die Veränderungen auf einem mittleren Level erlauben. Als „Low-Level" werden dort Veränderungen einzelner Code-Zeilen und als „High-Level" die Anpassung ganzer, für den Anwender sichtbarer Funktionalitäten bezeichnet. [Opd92] sieht Refactoring vor allem als Technik zur Weiterentwicklung von Frameworks. Ein Einsatz zur Evolution der Architektur innerhalb eines Projekts wird erst in [Fow99] vorgeschlagen und zum Beispiel im Extreme Programming-Ansatz (siehe Abschnitt 2.2) eingesetzt.

In Erweiterung der diskutierten Definitionen wird in diesem Buch eine Transformation als Refactoring bezeichnet, die ein gegebenes Modell und die darin enthaltenen Codeteile durch Anwendung eines oder mehrerer Schritte in ein neues, nach einem geeigneten Beobachtungsbegriff äquivalentes Modell transformiert.

[1] In [Fow00] wird Refactoring mit „Refaktorisierung" übersetzt und für die Anwendung einer Regel das Wort „refaktorisieren" verwendet. Dieses Buch nutzt, wie auch andere deutsche Publikationen [LRW02], die englischen Originalbegriffe.

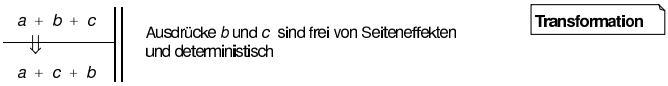
Algebraische Umformungen

Die einfachste Form des Refactorings ist die algebraische Umformung eines Ausdrucks. Dabei werden die mathematischen Gleichungen herangezogen, die zum Beispiel zur Vereinfachung von Ausdrücken eingesetzt werden können. Eine solche Regel ist beispielsweise:

Diese Regel kann sowohl auf Java-Ausdrücke als auch auf die OCL angewandt werden. Die Regel nutzt die bereits in Kapitel 4 eingeführten *Schemavariablen* als Platzhalter für andere Ausdrücke. Wichtig ist, dass *a* für beliebige Ausdrücke der Basissprache und nicht nur für Variablen steht. So einfach diese Regel aussieht, so hat sie bei einem Einsatz in Java doch Kontextbedingungen. So darf der für *a* eingesetzte Ausdruck keine Seiteneffekte haben. Zum Beispiel würde nach der Anwendung der Transformation auf `(i++)+(i++)` die Variable `i` einen anderen Inhalt haben und ein anderes Ergebnis entstehen.

Außerdem muss *a* deterministisch sein. Eine Abfrage der Zeit mit der statischen Query `Time.now()` für *a* wäre zum Beispiel nicht geeignet. Dies würde insbesondere dann auffallen, wenn die Regel:

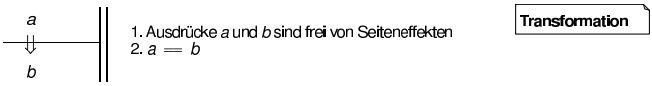
angewandt werden würde. Bei algebraischen Umformungen können weitere Effekte auftreten, die zu beachten sind. So kann der Tausch in der Reihenfolge einer Addition gemäß Regel



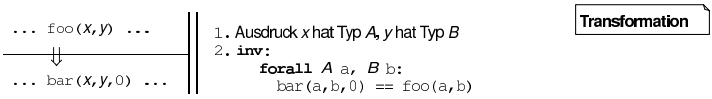
zu einem Überlauf führen, der nur in der neuen Berechnung auftritt, wenn *a* und *c* sehr groß und *b* negativ sind. Umgekehrt kann mit einer algebraischen Umformung das System robuster gegen arithmetische Exceptions gemacht werden. Durch geeignete Umformung numerischer Berechnungen kann das Ergebnis außerdem in seiner Genauigkeit beeinflusst werden.

Algebraische Umformungen sind jedoch keineswegs auf numerische Berechnungen beschränkt, sondern können auch auf andere Grunddatentypen und Container angewandt werden. Dazu zählen Vereinfachungen boolescher Berechnungen, Umformungen bei Strings, Ausnutzung von Kommutativitäts- und anderen Gesetzen bei Mengen, etc. Allerdings ist dabei die Seiteneffektfreiheit und die vorhandene Identität zum Beispiel bei Containern zu beachten.

Die ebenfalls aus der Mathematik bekannte *Substitution von Gleichem* kann wie folgt formuliert werden:



Diese Regel kann zum Beispiel angewandt werden, um einen Methodenaufruf durch einen anderen, allgemeineren zu ersetzen (`0` kann dabei auch eine andere Konstante sein):

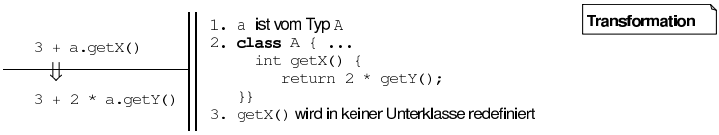


Damit lässt sich eine neue, allgemeinere Methode `bar` einführen und die alte Methode `foo` eliminieren. Diese Regel fordert in ihren Kontextbedingungen auch die Gültigkeit einer OCL-Invariante.

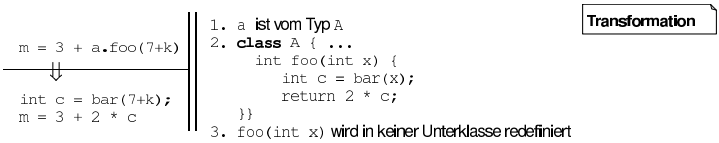
Algebraische Umformungen sind aus der Mathematik und den algebraischen Spezifikationstechniken [BFG+93, EM85] bekannt, werden aber nicht als Kern der für objektorientierte Sprachen entwickelten Refactoring-Techniken angesehen. Sie sind aber eine Grundlage, um die oft notwendigen Umformungen von Coderümpfen und Invarianten durchzuführen.

Expansion einer Methode

Ein weiteres Beispiel ist die Expansion einer Methode:



Etwas komplexere Methodenrümpfe erfordern ggf. Umbauten des expandierten Methodenrumpfs:



Diese Regelanwendungen nutzen dasselbe Prinzip, das beim „Inlining" von Methoden, zum Beispiel von optimierenden Compilern durchgeführt wird. Eine generalisierte Formulierung der Expansionsregeln ist aber mit

vielen Randbedingungen versehen, weil z.B. Variablen in einen anderen Bindungsbereich expandiert werden und versehentliche Gleichbennenung nicht erlaubt ist. Bei der Verwendung einer solchen Regel für das Refactoring wird oft das Ziel verfolgt, durch die Expansion eine nachfolgende algebraische Vereinfachung vorzunehmen oder das entstandene Codestück durch einen anderen Methodenaufruf wieder neu zu faktorisieren.

Tatsächlich lassen sich die skizzierten Expansionsregeln auch in umgekehrter Richtung als Extraktionsregeln[2] einsetzen, um Teilfunktionalität zu faktorisieren. Die Teilfunktionalität kann damit besser wiederverwendet oder eigenständig getestet werden und lässt sich in Unterklassen besser redefinieren.

Die Anwendung der Expansionsregel hat ebenfalls Kontextbedingungen und erfordert meistens auch zusätzliche Maßnahmen zur Anpassung des expandierten Codes. Ist die expandierte Methode von einer anderen Klasse, so ist zum Beispiel als Kontextbedingung zu fordern, dass kein Attribut dieser Klasse verwendet wird. Dies kann durch eine vorbereitende Maßnahme erreicht werden, indem alle verwendeten Attribute durch Methodenaufrufe gekapselt werden.

Durch die Expansion geht die dynamische Bindung der Methode verloren. Deshalb darf die expandierte Methode in keiner Unterklasse redefiniert worden sein. Alternativ könnte durch Datenflussanalysen gesichert werden, dass das Objekt in *a* tatsächlich genau von Klasse *A* ist.

Die Kontextbedingungen für das Faktorisieren eines Codestücks in eine Teilmethode sind typischerweise komplex. Allerdings sind die meisten dieser Kontextbedingungen durch *syntaktische Analysen* überprüfbar, so dass die Korrektheit einer solchen Regelanwendung wie auch im Fall der Expansion automatisch geprüft werden kann. Nicht entscheidbare Kontextbedingungen können oft durch relativ einfach prüfbare syntaktische Bedingungen so verschärft werden, dass Entscheidbarkeit gegeben ist. Beispiel ist etwa die Sicherstellung, dass die private Methode `foo` nur auf das eigene Objekt `self` angewendet wird: Während das für beliebige Ausdrücke *a*`.foo()` unentscheidbar ist, ist es durch Restriktion auf `self.foo()` trivial.

Restrukturierung der Klassenhierarchie

Weitere Refactoring-Techniken bearbeiten die durch Klassendiagramme vorgegebene Struktur des Systems. So können Abstraktionen als neue, gemeinsame Oberklassen faktorisiert werden oder Attribute und Methoden entlang der Klassenhierarchie verschoben werden. Die Abbildung 9.2 demonstriert die Einführung einer neuen Klasse inmitten der Klassenhierarchie. Diese Klasse erhält die aus der Unterklasse extrahierte gemeinsame Implementierung der Methode `validateBid()`, die an diese Stelle verschoben wird.

[2] Die Regel zur Extraktion ist in anderen Transformationsansätzen als „Folding“ bekannt.

Damit dies möglich wird, werden klassenspezifische Unterschiede in eigenständige Methoden faktorisiert. Zum Beispiel enthält die neue Methode `setNewBestBid()` den für die Unterklassen spezifischen Vergleich, ob sich ein Gebot als neues Bestgebot qualifiziert.

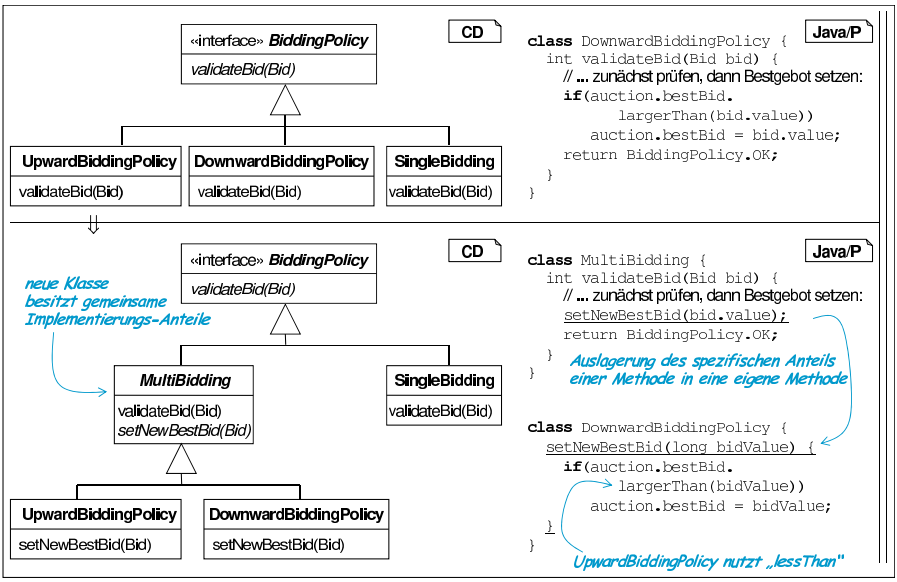


Abbildung 9.2. Einführung einer neuen Oberklasse

Das dargestellte Refactoring ist bereits auf die zu bearbeitende Applikation spezialisiert und zeigt mehrere Schritte gleichzeitig. Unter Benutzung der in Abschnitt 4.4.2 eingeführten Schemavariablen lässt sich die Einführung der neuen Klasse auch allgemeiner darstellen, indem statt konkreten Klassen- und Methodennamen ausfüllbare Platzhalter eingesetzt werden.[3]

Attribute und Methoden können entlang von Assoziationen verschoben werden, wenn die entsprechende Assoziation und die daran beteiligten Klassen bestimmte Bedingungen erfüllen. So darf sich ein etablierter Link einer solchen Assoziation normalerweise nicht mehr verändern, um den Zugriff auf ein verlagertes Attribut zu erlauben. Diese zeitlichen Kontextbedingungen können aber durch eine statische Analyse normalerweise nicht mehr erkannt werden sondern erfordern zusätzliche Maßnahmen, wie zum Beispiel den Einsatz geeigneter Invarianten und Tests.

[3] Schemavariablen können auch als Platzhalter für Listen von Attributen oder Unterklassen eingesetzt werden, allerdings ist dafür eine intuitive graphische Darstellung notwendig, die in diesem Buch nicht vertieft wird.

Signaturveränderung

Refactoring-Schritte können interne Veränderungen bewirken oder Veränderungen der Signatur von Systemteilen hervorrufen. Die Entfernung einer nicht mehr benötigten lokalen Variable ist zum Beispiel unkritisch. Die Entfernung einer Methode ist dann problematisch, wenn diese in der Signatur der Klasse oder des Subsystems *publiziert* wurde und es möglich ist, dass andere Entwickler die für die Löschung vorgesehene Methode verwenden. Deshalb ist es oft notwendig, Refactoring nicht auf lokal begrenzte, offene Teilsysteme anzuwenden, sondern das System möglichst in seiner Gänze zu bearbeiten.

Die Veränderung von Signaturen zeigt auch, dass hier der Beobachtungsbegriff eine wesentliche Rolle spielt. Über die in Abbildung 9.1 geforderte Verhaltensäquivalenz des Gesamtsystems hinaus bieten Schnittstellen innerhalb des Systems und zu anderen Systemteilen zusätzliche Beobachtungspunkte, die bei einer Anwendung von Refactoring-Techniken zu beachten sind.

9.2 Methodik des Refactoring

9.2.1 Technische und methodische Voraussetzungen für Refactoring

Wie viele andere Elemente im Portfolio einer agilen Methodik ist Refactoring besonders erfolgreich in Kombination mit weiteren Techniken und Konzepten:

- Objektorientierung, speziell Vererbung und Polymorphie
- Automatisierte Tests
- Gemeinsamer Modell- und Codebesitz
- Keine oder kaum zusätzliche Dokumentation
- Modellierungs- beziehungsweise Codierungsstandards

Bereits in [Mey97] werden *objektorientierte Konzepte* als hilfreich für die Wiederverwendung von Softwarekomponenten angesehen. Insbesondere die Bildung von Unterklassen, die dynamische Konfigurierbarkeit von Objektstrukturen, die dynamische Bindung von Methoden und die daraus resultierende Möglichkeit zur partiellen Redefinition von Verhalten werden als Faktoren zur besseren Wiederverwendung erkannt. Die in Kapitel 8 vorgestellten Testmuster zeigen, dass objektorientierte Konzepte auch zur Definition von Tests hilfreich eingesetzt werden können.

Automatisierte Tests aber bilden einen wesentlichen Eckpfeiler für den Erfolg der Refactoring-Techniken. Automatisierte Tests erlauben die effiziente Überprüfung, ob bei der Durchführung eines Refactorings die nicht direkt betroffene Funktionalität noch ihre Aufgaben erfüllt. Fehlen Tests für Systemteile die einem Refactoring unterworfen werden sollen, so ist zu empfehlen, zunächst geeignete Tests zu entwickeln. Wie in Abschnitt 9.3.3 noch

besprochen wird, legen außerdem die vom Anwender des zu entwickelnden Systems vorgegebenen Akzeptanztests einen Beobachtungsbegriff für Refactoring-Schritte fest.

Ist jedes Artefakt einem Besitzer zugeordnet, der dieses Artefakt kontrolliert und als einziger modifizieren darf, dann ist Refactoring zum Scheitern verurteilt. Der Abstimmungsaufwand, der zwischen den Besitzern notwendig ist, an mehreren Artefakten parallel (und aufgrund der Mikro-Iterationen nahezu zeitgleich) Änderungen vorzunehmen, ist praktisch nicht realisierbar. Hinzu kommt, dass Besitzer eines Artefakts die zusätzliche Arbeitsbelastung ablehnen, wenn ein Refactoring nicht für sie, sondern nur für das Nachbarsystem von Vorteil ist. In solchen Fällen wird oft nicht die für die Architektur beste Lösung, sondern die für den Diskussionssieger am wenigsten arbeitsintensive Lösung gewählt. Der *gemeinsame Modellbesitz* erlaubt einzelnen Entwicklern, Refactorings auch über Schnittstellen und Artefakte hinweg effizient durchzuführen und erst das modifizierte und wieder komplett lauffähige System in das Repository einzuchecken. Durch die Existenz der automatisierten Tests verlagert sich der Abstimmungsaufwand zwischen den Entwicklern zu einem „Abstimmungsaufwand“ zwischen dem Entwickler (oder Entwickler-Paar) und den automatisch durchführbaren Tests.

Refactoring verändert die Struktur eines Systems. Ist die Struktur nicht nur durch die für die Codegenerierung verwendeten Modelle, sondern zusätzlich durch weitere Dokumentation beschrieben, so entsteht der Aufwand, diese Dokumente ebenfalls zu aktualisieren. Dieser Aufwand kann aber leicht dieselbe Größenordnung wie das Refactoring selbst erreichen und übertreffen. Nicht zu unterschätzen ist dabei der Aufwand, dass in einem Dokument die zu ändernden Stellen zuerst zu identifizieren sind. Die Sicherung der Qualität eines Dokuments, also insbesondere der Übereinstimmung mit der Implementierung ist hier besonders kritisch. Werden dafür keine geeigneten Maßnahmen getroffen, so ist das Vertrauen der Entwickler in die Aktualität der Dokumente nicht gegeben und die Dokumente sind relativ wertlos. Refactoring kann also am effektivsten eingesetzt werden, wenn keine zusätzliche detaillierte Dokumentation existiert. Dafür sind aber präzise Modellierungsstandards einzuhalten, damit den Entwicklern der Zugang zu den Modellen erleichtert wird. Auch Ansätze wie „Literate Programming“ mit intensiver Verzahnung von Modell und Dokumentation sind dafür leider wenig geeignet, da die informelle Dokumentation nicht automatisch angepasst werden kann.

9.2.2 Qualität des Designs

Wie in Abbildung 9.3 skizziert, ist Refactoring orthogonal zur Entwicklung neuer Funktionalität. Während in der normalen Weiterentwicklung neue Funktionalität hinzugefügt und dabei in Kauf genommen wird, die Qualität des Designs zu verschlechtern, wird beim Refactoring die Funktionalität beibehalten und die Qualität des Designs normalerweise verbessert.

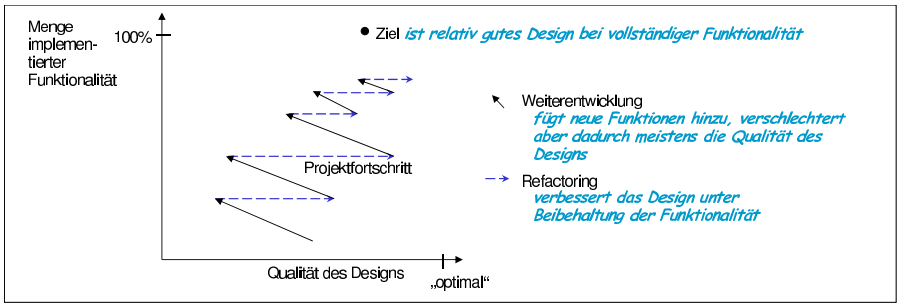


Abbildung 9.3. Refactoring und Weiterentwicklung ergänzen sich

Für die Funktionalität eines Systems existieren Maße, wie beispielsweise die Function Point Methode [AG83] oder deren objektorientierte Anpassung [Sne96]. Im einfachsten Fall kann auch der Anteil der bereits umgesetzten Anforderungen als Maß für die implementierte Funktionalität verwendet werden.

Demgegenüber gibt es derzeit kein allgemein anerkanntes Verfahren, um die Qualität eines Designs objektiv zu messen. Kriterien, die für Programmiersprachen entwickelt wurden, um die „Optimalität“ eines Designs zu messen, sind abhängig von der Programmiersprache und der Erfahrenheit der Entwickler. Zum Beispiel werden für objektorientierte Sprachen andere Kriterien vorgeschlagen, als vor 10-20 Jahren für prozedurale Sprachen diskutiert wurden. Wesentlich sind zum Beispiel, die *Kopplung* von Klassen möglichst gering zu halten, einzelne Klassen nicht zu groß oder klein zu halten, *die Tiefe einer Vererbungshierarchie* zu beschränken, etc. Defizite werden unter anderem in [Fow99] als „Bad Smells“ bezeichnet und 22 davon aufgezählt.

Jedoch sind nicht nur Refactoring-Schritte sinnvoll, die das Design bezüglich einer gegebenen Metrik verbessern. Refactoring sollte vor allem auch eingesetzt werden, um in einem nachfolgenden Schritt neue Funktionalität besser hinzufügen zu können. Das zielgerichtete Refactoring kann daher zunächst ein Design verschlechtern, um neue Funktionalität hinzuzufügen oder um weitere Refactoring-Schritte vorzunehmen. Ein typisches Beispiel ist etwa die Teilung einer Klasse in zwei, durch eine `1-zu-1`-Assoziation verbundene Klassen und die nachfolgende Verallgemeinerung der Assoziation in die Form `1-zu-*`.

Hilfreich ist dabei zum Beispiel die Identifikation von Defiziten mit Metriken sowie der Vorschlag zu deren Behebung durch geeignete Refactoring-Schritte. Die Entscheidung, ob ein Refactoring-Vorschlag durchgeführt wird, muss allerdings beim Anwender liegen, der das Design und die zugrunde liegende Motivation kennt.

Einige durch Metriken auf Programmiersprachen typischerweise gemessenen Elemente, wie die Vererbungshierarchie oder die Kopplung von Klas-

sen können weitgehend unverändert übernommen werden. Andererseits erlaubt die größere Kompaktheit der UML gegenüber Java eine größere Dichte von Funktionalität innerhalb einer Klasse und damit die Reduktion der Anzahl notwendiger Klassen. Immerhin wird ein Teil der Standardfunktionalität, wie `get`- und `set`-Methoden für Attribute, Factories, technische Methoden zur Speicherung, etc. durch den Codegenerator hinzugefügt und sind deshalb im Modell für den Entwickler nicht mehr sichtbar.

Parallel dazu können für die Notationen der UML/P weitere Kriterien guten Entwurfs angegeben werden. Ein Objektdiagramm, das sehr viele Objekte beinhaltet sollte zum Beispiel in mehrere Objektdiagramme geteilt und durch die in Abschnitt 4.3, Band 1 skizzierte Logik für Objektdiagramme kombiniert werden. Auch die Größe und Form von Statecharts, Sequenz- und Klassendiagrammen sowie von OCL-Bedingungen können geeigneten Metriken unterliegen, die aber erst auf Basis empirischer Untersuchungen erstellt werden müssen. Zum Beispiel kann dabei die aus anderen Bereichen bereits bekannte Regel eingesetzt werden, dass ein Betrachter nur bis zu 5 ± 2-Elemente gleichzeitig erfassen kann.

9.2.3 Refactoring, Evolution und Wiederverwendung

Das Refactoring der innneren Strukturen eines Systems führt zunächst zu keiner für den Anwender und Kunden sichtbaren Verbesserung der Systemfunktionalität. Entsprechend ist die Motivation ein Refactoring durchzuführen gut zu begründen.

Unter ökonomischen Gesichtspunkten betrachtet ist ein Refactoring nur dann sinnvoll, wenn es auf ein Ziel ausgerichtet ist, das den Arbeitsaufwand rechtfertigt. Wie in Abbildung 9.3 gezeigt, muss das entstehende System kein optimales Design besitzen. Das Design muss jedoch während des gesamten Entwicklungsprozesses gut genug sein, um Weiterentwicklungen zu erlauben. Um auch zukünftige Weiterentwicklungen zu ermöglichen, sollte das Design auch gegen Ende des Projekts eine gute Qualität besitzen.

Deshalb ist der Nutzen eines Refactorings immer gegen den notwendigen Aufwand abzuschätzen. Insbesondere für große Modifikationen, die die technische oder fachliche Architektur des Systems verändern, indem sie zum Beispiel die Kommunikationsinfrastruktur (Middleware) austauschen oder Kernelemente der Datenstruktur modifizieren, sollten vorher in ihren Aufwänden abgeschätzt werden. Es kann aufgrund bisheriger praktischer Erfahrungen festgehalten werden, dass bei konsequenter Anwendung von Refactoring-Schritten sogar durch die relativ einfache Unterstützung durch Such- und Ersetzungs-Funktionalität einer Entwicklungsumgebung und einer vorhandenen Testsammlung der Fortschritt deutlich schneller ist, als oft geschätzt.

Refactoring-Schritte können nicht nur innerhalb eines Softwareentwicklungsprojekts, sondern auch für den ursprünglich in [Opd92] vorgesehenen

Zweck, der Evolution und Wiederverwendung von Frameworks in unterschiedlichen Projekten, eingesetzt werden.

Ein Framework wird normalerweise als eigenständiges Artefakt weiterentwickelt, indem in jeder Applikation neue Funktionalität zum Framework hinzugefügt wird und notwendige Restrukturierungen vorgenommen werden. Dabei wird aber besonders darauf geachtet, die Kompatibilität des Frameworks mit den ursprünglichen Applikationen zu wahren, um auch diese weiterentwickeln zu können. In einem agilen Projekt spielen bei Anwendung des Prinzips der *Einfachheit* diese Überlegungen keine Rolle. Deshalb ist Extreme Programming ohne Anpassungen nicht geeignet, um damit Frameworks zu entwickeln. Um die Wiederverwendung von Frameworks zu erhöhen, sind zusätzliche methodische Vorkehrungen zu treffen, die eine Abschirmung des Frameworks gegen beliebige Modifikationen erlauben. In diesem Fall sind agile und Framework-basierte Methoden zu kombinieren, wie dies zum Beispiel in [FPR01] skizziert ist.

9.3 Modelltransformationen

In Abbildung 9.1 wurde eine Definition des Refactorings angegeben, dessen Konzepte in diesem Abschnitt genauer analysiert werden. Dabei werden die Natur von Modelltransformationen, ein Beobachtungsbegriff, ein Transformationskalkül und das Zusammenspiel mit der Semantik der Modellierungssprache diskutiert.

9.3.1 Formen von Modelltransformationen

Grundsätzlich ist eine Modelltransformation eine Abbildung ausgehend von einem syntaktisch wohlgeformten Ausdruck der Quellsprache UML/P. Als Zielsprache wird jedoch anders als bei der Codegenerierung nicht Java, sondern wieder die Quellsprache UML/P eingesetzt. Grundsätzlich bleibt aber auch die Vorgehensweise zur Betrachtung der Bedeutung, also der Semantik einer Modelltransformation dieselbe. Abbildung 9.4 beschreibt aufbauend auf Abbildung 4.9 das Grundmuster einer parametrisierbaren Modelltransformation.

Da Modelltransformationen Abbildungen sind, können ihre funktionalen Eigenschaften untersucht werden. Eine Abbildung kann *partiell* definiert sein, weil die Voraussetzungen für die Anwendbarkeit der Transformation nicht gegeben sind oder das entstehende neue Modell nicht wohldefiniert ist. Beispielsweise kann eine Unterklasse nur eingefügt werden, wenn die Oberklasse existiert. Soll andererseits eine Klasse eingefügt werden, die bereits existiert, so entsteht ein nicht wohlgeformtes Modell. Wie in diesen beiden Beispielen können viele dieser Voraussetzungen automatisch geprüft werden. Dies ist aber nicht mit allen Voraussetzungen möglich.

Zur kompakten **Formalisierung des Modelltransformations-Konzepts** werden folgende Definitionen benötigt:

- die Modellsprache (UML/P) als eine Menge UML von syntaktisch wohlgeformten Ausdrücken und
- eine Skriptsprache zur Beschreibung der Transformation mit dem Sprachschatz S.

Eine Modelltransformation ist demnach eine Abbildung $T : UML \rightarrow UML$. Wird die Modelltransformation mit einem Skript parametrisiert, so entspricht dies einer Abbildung $T_p : S \times UML \rightarrow UML$.
T_p ist damit eine Art Interpreter der Skriptsprache S für Modelltransformationen. Auf Basis der gelifteten, aber mathematisch äquivalenten Fassung $T'_p : S \rightarrow UML \rightarrow UML$ ist für ein Skript $s \in S$ jede Transformation von der Form $T'_p(s)$.

Abbildung 9.4. Prinzip einer Modelltransformation

Eine Modelltransformation kann *injektiv* sein. Interessant ist auch der Fall, wenn diese nicht injektiv ist, da dann offensichtlich zunächst unterschiedliche Modelle auf dasselbe neue Modell abgebildet werden und informationstragende Details verloren gehen. Solche Transformationen haben typischerweise Abstraktionscharakter und sind nicht notwendigerweise in allen Details *semantikerhaltend*. Ein Beispiel ist die Entfernung aller Attribute aus einem Klassendiagramm. So entsteht eine abstraktere Darstellung mit weniger Detailinformation.

Die *Surjektivität* einer Modelltransformation ist normalerweise nicht gegeben, das heißt nicht jedes Modell wird durch Transformationen erzeugt. Untersuchenswert ist aber bei einem Kalkül, ob die Gesamtheit der zur Verfügung stehenden Modelltransformationen und deren Kombination surjektiv ist. Damit wäre es möglich, aus einem generischen Start, zum Beispiel einem „leeren“ Modell, jedes Modell durch Transformationsschritte zu entwickeln. So werden zum Beispiel beim Delta-Modelling [CHS10, HKR+11a, HKR+11b] Transformationen zum Aufbau von Produktvariabilitäten genutzt.

9.3.2 Semantik einer Modelltransformation

Prinzip der Semantik für eine Transformation

Die Verwendung einer Abbildung statt einer Relation zur Erklärung von Modelltransformationen weist auf den konstruktiven Charakter der Transformation hin. Eine Relation, wie zum Beispiel eine Abstraktions-[4] oder Verfeinerungsrelation, kann auf der Seite der Semantik verwendet werden. In

[4] Eine abstrakte Oberklasse stellt eine *Abstraktion* innerhalb des Modells dar. Davon zu unterscheiden ist eine Modelltransformation, die eine *Abstraktion* zwischen Modellen durchführt. Die Einführung einer neuen Oberklasse in ein Klassendia-

Abbildung 9.5 wird in Erweiterung der Abbildung 9.4 das Prinzip zur Semantikdefinition einer Modelltransformation diskutiert.

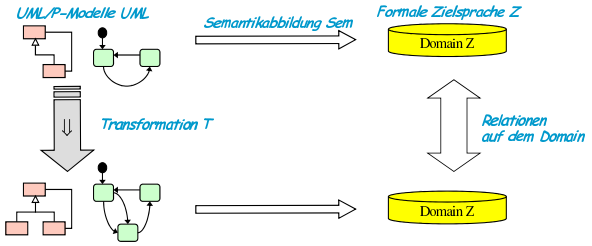
Zur Darstellung der **Semantik einer Modelltransformation** werden aufbauend auf Abbildung 9.4 folgende Definitionen benötigt:

- eine geeignete formale Zielsprache mit dem Sprachschatz Z,
- eine formale Semantik $Sem : UML \to \mathbb{P}(Z)$, die jedem Element $u \in UML$ eine Menge $Sem(u)$ von Elementen der Zielsprache zuordnet.
- Relationen $R \subseteq \mathbb{P}(Z) \times \mathbb{P}(Z)$, die Beziehungen wie Abstraktion, Signaturwechsel, Verfeinerungen, etc. zwischen Elementen der Zielsprache darstellen.

Eine *Modelltransformation genügt einer solchen Relation R in Bezug auf ein Modell $u \in UML$*, wenn für das transformierte Modell u gilt:

$$(Sem(u), Sem(T(u))) \quad \in \quad R$$

Diese Bedingung lässt sich graphisch durch ein kommutierendes Diagramm illustrieren:



Wenn diese Beziehung für alle Modelle $u \in UML$ gilt, für die das transformierte Modell wohlgeformt ist, das heißt u genügt den Kontextbedingungen der Transformation T und $T(u) \in UML$, dann *genügt die Modelltransformation der Relation R* beziehungsweise *ist eine operative Umsetzung von R*.
Es gibt typischerweise viele verschiedene Modelltransformationen, die derselben Relation genügen. Wird die Transformation durch ein Skript $s \in S$ beschrieben, so *genügt ein Skript einer Relation R*, wenn die Transformation $T'_p(s)$ der Relation R genügt.

Abbildung 9.5. Modelltransformation und Modell-Semantik

Das in Abbildung 9.5 beschriebene Prinzip der Semantik einer Modelltransformation kann so verstanden werden, dass für die Korrektheit einer Transformation die graphisch dargestellte Kommutativität nachgewiesen wird. Jedoch ist dies in der Praxis insbesondere bei größeren Transformationen nicht ohne weiteres durchführbar. Stattdessen wird dort durch

gramm ist in diesem Sinn keine *Modellabstraktion*, sondern im Gegenteil fügt neue Information zum Modell hinzu. Diese führt allerdings im Allgemeinen nicht zu extern beobachtbaren anderen Verhalten und deshalb zu einem Refactoring.

explizite Diskussion von zu beachtenden Sonderfällen und durch Nutzung von Testsammlungen mit Invarianten eine informelle Rechtfertigung für die Transformation gegeben, der formale Nachweis der Korrektheit aber dem gegebenenfalls Ausführenden überlassen. Bei der in Abschnitt 10.1.2 diskutierten Granularität zum Beispiel der Refactoring-Regeln aus [Fow99] aber auch bei der hier gezeigtem Regeln wäre für eine Formalisierung zunächst noch eine deutliche Detaillierung der Kontextbedingungen und der Sonderfälle vorzunehmen. Diese sind zum Beispiel für eine Umsetzung der Refactoring-Regeln in Werkzeuge notwendig. Auf der Basis einer auf diese Weise präzisierten Beschreibung lässt sich dann über die Durchführung von Beweisen zur Korrektheit von Refactoring-Regeln nachdenken.

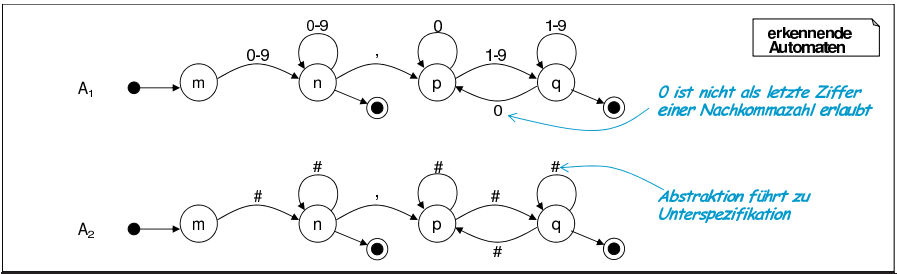
Beispiele für Semantiken und Relationen

Ein wesentliches Element der Betrachtung der Bedeutung einer Modelltransformation in Abbildung 9.5 ist das Vorhandensein von Relationen R auf der als Semantik verwendeten Zielsprache Z. Je nachdem wie gut die Theorie dort ausgebaut ist, die zu einer als Semantik geeigneten Zielsprache gehört, stehen unterschiedlich mächtige Relationen zur Verfügung. Ein Beispiel für eine ausgereifte Theorie stellen die Ströme in Focus [BS01b] dar, die Abstraktions- und Verfeinerungsrelationen unterschiedlichster Art, von Signatur- bis hin zur Interaktions- und Zeitverfeinerung für verteilte Systeme anbieten.

Ein weiteres Beispiel bilden die in Abschnitt 5.2, Band 1 eingeführten erkennenden Automaten mit einer Semantik in Form von Mengen erkannter Wörter des Eingabealphabets. Wird die erkannte Menge von Wörtern als Beobachtung angenommen, so sind zum Beispiel die aus der Automatentheorie [HU90, Bra84] bekannten Transformationen zur Berechnung einer deterministischen Automatenvariante oder zur Minimierung als Refactorings verstehbar. Auch die meisten Transformationsregeln für Statecharts aus Abschnitt 5.6.2, Band 1 verändern nur die Struktur eines Statecharts, wirken sich aber nicht auf das von außen beobachtbare Verhalten aus.

Bei den Automaten entspricht die Ersetzung eines Eingabezeichens einer Transformation zur *Umbenennung der Signatur*. Eine *Abstraktion auf Signaturebene* ist zum Beispiel, wenn eine Gruppe von Eingabezeichen durch ein einzelnes Zeichen ersetzt wird. Abbildung 9.6 zeigt den Effekt einer Abstraktion auf einen erkennenden Automaten.

Bei echten Abstraktionen geht Information des detaillierten Ausgangsmodells verloren. Es ist daher ein Merkmal von Abstraktionen, dass mehrere Ausgangsmodelle auf dasselbe Zielmodell abgebildet werden. Abstraktionen sind also normalerweise nicht surjektiv. Eine Abstraktion eignet sich daher auch nicht zur Weiterentwicklung eines Modells, sondern zur Analyse oder zur Definition von Tests, die von dem abstrakteren Modell besser abgeleitet werden können.



Sei $L(A_i)$ die Menge der von dem Automat A_i erkannten Wörter. Automat A_1 beschreibt ein Zahlenformat, das keine `0` als letzte Nachkommastelle zulässt.
In einer Abstraktion werden die einzelnen Ziffern durch ein Zeichen `#` ersetzt. Auf dem Alphabet lautet die Abstraktionsrelation

$$\phi = \{(n, \texttt{'\#'}) \mid n \in [\texttt{'0'}, \ldots, \texttt{'9'}]\}$$

Diese wird punktweise auf Wörter ausgedehnt. Beispiel: $(\texttt{'17.33'}, \texttt{'\#\#.\#\#'}) \in \phi$.
Eine Ersetzung der Ziffern im Automat A_1 gemäß ϕ führt zu Automat A_2.
Es gilt für jedes Wort w_1, das von A_1 erkannt wird, dass die Abstraktion w_2 entsprechend von A_2 erkannt wird:

$$\forall w_1, w_2 : w_1 \in L(A_1) \wedge (w_1, w_2) \in \phi \Rightarrow w_2 \in L(A_2)$$

Die Umkehrung gilt jedoch nicht, wie das Beispiel `'17.30'` zeigt.
Wie bei Abstraktionen häufig der Fall, geht dabei Information verloren. Zum Beispiel können die nur mit der Ziffer `0` markierten Transitionen nicht mehr detailliert genug dargestellt werden. Es entsteht eine gegenüber dem ursprünglichen Automat *unterspezifizierte* Darstellung, die immer noch wesentliche Informationen enthält, aber nicht mehr so detailliert ist.

Abbildung 9.6. Abstraktion am Beispiel eines erkennenden Automaten

Beachtenswert ist auch, dass *Abstraktion* auf der syntaktischen Ebene bedeutet, dass Elemente oder Detailinformation aus dem Modell entfernt werden und das Modell in diesem Sinne „kleiner" wird. Demgegenüber wird wegen der Form der Semantikdefinition Sem, die, wie in Abschnitt 4.1.1 diskutiert, auch als *lose Semantik* bezeichnet wird, die Menge von möglichen Implementierungen größer. Die Abstraktionsrelation stellt sich damit als Mengeninklusion dar (formal: $R = \{(X, Y) | X \subseteq Y\}$).

Die umgekehrte Relation wird *Verfeinerung* genannt. Sie erlaubt es, aus einem abstrakten Modell durch das Hinzufügen von Information zu einem konkreteren, detaillierteren und damit auch vollständigeren Modell zu gelangen.

Wie nachfolgend diskutiert, dienen die Refactoring-Techniken der Semantikerhaltung. Sie bilden damit weder Abstraktionen noch Verfeinerungen der Ausgangsmodelle, sondern stellen lediglich eine nach außen nicht beobachtbare Umstrukturierung dar. Die zugehörige Relation wird daher

eine Äquivalenz sein, die auf Basis des später eingeführten Beobachtungsbegriffs als Identität wirkt.

Die hier gezeigten Beispiele stammen aus der relativ einfachen und gut verstandenen Theorie endlicher Automaten, weil sich dadurch das Prinzip am besten erklären lässt. Bei den syntaktisch wesentlich reichhaltigeren Statecharts gilt dasselbe Prinzip, aber es sind die zu beachtenden Rahmenbedingungen komplexer. Wesentlich ist bei den Statecharts auch, dass diese eine Ausgabe besitzen, die zusätzlich zur Eingabe beobachtet werden kann. Die sich daraus ergebenden semantikerhaltenden Transformationen für Statecharts wurden in Abschnitt 5.6.2, Band 1 bereits diskutiert.

Kategorien von Semantikrelationen

In den gezeigten Beispielen werden drei semantische Relationen vorgestellt. Eine Kategorisierung zeigt, dass aufgrund der gewählten Semantik auch nur wenige Relationen notwendig sind. Als Kategorien sind identifizierbar:

1. Die *Abstraktion*, die von Details abstrahiert. Das sich ergebende Modell hat als Semantik eine Obermenge des Ausgangsmodells.
2. Die *Verfeinerung*, bei der Details hinzugefügt werden. Verfeinerung ist damit die Umkehrung der Abstraktion.
3. Das *Refactoring* als bezüglich einer vorgegebenen Beobachtung semantikerhaltende Transformation. Refactoring kann gleichermaßen als Spezialfall von Verfeinerung und Abstraktion (bezüglich der Beobachtung) gesehen werden.
4. *Signaturwechsel* durch *Umbenennung* von syntaktischen Elementen, die in Schnittstellen sichtbar sind.

Die Kategorisierung der semantischen Relationen lässt sich direkt in eine Kategorisierung der Transformationsregeln übertragen. Es gibt also Transformationsregeln für *Abstraktion*, *Verfeinerung*, *Refactoring* und *Signaturwechsel*, wobei diese Kategorien nicht disjunkt sind. Beispielsweise ist ein Signaturwechsel als Refactoring bezüglich einer Beobachtung auffassbar, die die Signatur nicht beachtet.

Die Ersetzung der Ziffern durch das Zeichen '#' in dem Beispiel in Abbildung 9.6 ist eine Abstraktion. Andere Formen von Abstraktionen bestehen darin, Klassen aus einem Klassendiagramm, Objekte aus einem Objektdiagramm, etc. zu entfernen. Das entstehende Modell ist jeweils weniger aussagekräftig. Umgekehrt können in einer Verfeinerung neue Klassen hinzugefügt werden. Ob es sich allerdings um eine echte Verfeinerung handelt, hängt vom nachfolgend diskutierten Beobachtungsbegriff ab.

Transformationen auf Mengen von Artefakten

In Abschnitt 1.4.4, Band 1 wurde festgelegt, dass unter dem Begriff „Modell" sowohl ein einzelnes Artefakt, also zum Beispiel ein Klassendiagramm oder

ein Statechart, als auch eine Sammlung dieser Artefakte zur Beschreibung mehrerer Aspekte verstanden wird. Deshalb werden Modelltransformationen in Abbildung 9.7 auf Mengen von bearbeiteten Artefakten ausgeweitet (eine mit Skripten parametrisierte Form kann analog festgelegt werden). Damit kann zum Beispiel die Umbenennung einer Methode an allen auftretenden Stellen konsistent erfolgen.

Die Ausdehnung der **Modelltransformationen auf Mengen** wird aufbauend auf Abbildung 9.5 festgelegt.
Eine Modelltransformation wird erweitert zu einer Abbildung $T : \mathbb{P}(UML) \rightarrow \mathbb{P}(UML)$ auf Mengen, indem jedes Artefakt der Menge $M \subseteq UML$ einzeln transformiert wird:

$$T(M) = \{T(u) | u \in M\}$$

Die Semantikdefinition wird erweitert zu $Sem : \mathbb{P}(UML) \rightarrow \mathbb{P}(Z)$, indem für Mengen von Modellen $M \subseteq UML$, wie bei losen Semantiken üblich, festgelegt wird:

$$Sem(M) = \bigcap_{u \in M} Sem(u)$$

Abbildung 9.7. Modelltransformation auf Mengen von Artefakten

Die Motivation für die in Abbildung 9.7 verwendete Definition der Semantik ist, dass ein Modell u_1 als zu erfüllende Bedingung an ein System gesehen werden kann. Es gibt also eine Menge $Sem(u_1)$ von Systemen, die die gestellte Bedingung erfüllen. Wird ein zweites Modell u_2 als zusätzliche Bedingung aufgestellt, so ergibt sich die Menge von nun als Realisierung infrage kommender Systeme als $Sem(\{u_1, u_2\}) = Sem(u_1) \cap Sem(u_2)$, also genau die Systeme, die beide Bedingungen erfüllen.

Offene und geschlossene Systeme

Die heute übliche Form der Anwendung von Modelltransformationen sowohl bei CASE-Werkzeugen für SDL oder UML-Modelle, als auch bei Entwicklungsumgebungen mit Refactoring-Unterstützung ist die Annahme eines weitgehend *geschlossenen Systems*.

Ein Modell heißt *offen*, wenn es ein *offenes System* modelliert, also explizite Schnittstellen an die Systemumgebung hat, deren Signatur nicht geändert werden kann und über deren Verhalten die Systemumgebung Annahmen macht. Dazu gehören Nachbarsysteme, die zum Beispiel vom Kollegen bearbeitet werden, vorgegebene Frameworks, das Betriebssystem oder Middleware-Komponenten. Ein Modell heißt *geschlossen*, wenn solche Schnittstellen nicht existieren.

Ein geschlossenes Modell entsteht typischerweise dann, wenn die Umgebung des Systems explizit in dem Modell enthalten ist. Geschlossene Modelle sind leichter zu modifizieren und anzupassen, als offene Modelle, weil in

einem offenen Modell die Zusicherungen des Systems gegenüber der Umgebung beibehalten werden müssen. Schnittstellen und Interaktionsmuster dürfen gegenüber der Umgebung nicht verändert werden.

Obwohl in heutigen Systemen zum Beispiel mit Frameworks nahezu immer Schnittstellen zur Umgebung vorhanden sind, wird allgemein versucht, möglichst so zu arbeiten, als würde ein geschlossenes System vorliegen. In dem in [SD00] propagierten und auch in Kapitel 8 verwendeten Ansatz zur Separation des Applikationskerns von externen Komponenten durch Adapter entsteht eine geschlossene Form als Nebeneffekt, indem Schnittstellen zur Umgebung gekapselt werden. Die Adapter werden dann als Teil des Systems behandelt und es entsteht der Effekt eines geschlossenen und damit kontrollier- und manipulierbaren Systems.

Der aus dem methodischen Ansatz des Buchs stammende und in Abschnitt 9.2 diskutierte gemeinsame Modellbesitz für Entwickler hat einen analogen Effekt. So werden Grenzen zwischen den von einem Entwickler selbst erstellten Artefakten und denen der Teamkollegen aufgehoben. Die Umgebung des von ihm primär bearbeiteten Bereichs ist damit für einen Entwickler zugänglich und veränderbar, wie in einem geschlossenen System.

Systemmodell als semantischer Domain

In den Abbildung 9.4 und 9.5 wurden die abstrakten Mengen UML und Z für die Syntax und den semantischen Domain eingeführt. Während die syntaktische Form der UML/P in Band 1 ausführlich diskutiert wurde und im Anhang C, Band 1 durch EBNF-Produktionen und Syntaxklassendiagramme dargestellt ist, wurde der Domain für die Formalisierung der Semantik noch nicht weiter charakterisiert.

Für semantische Domains gibt es eine Reihe von Vorschlägen, die zur Formalisierung von Teilen der UML eingesetzt wurden. [HR00, HR04] enthält dazu eine Übersicht. Zum Einsatz kommen vor allem verschiedene Logiken und mathematische Formalismen, die meistens um spezifische Konstrukte erweitert wurden. Dazu gehört zum Beispiel [BHH+97], in dem eine Formalisierung größerer Teile der UML auf Basis eines verteilten, asynchron kommunizierenden Formalismus diskutiert wurde, oder [FELR98b], in dem eine Transformation in die formale Sprache Z [Spi88] vorgenommen wurde.

Die formale Definition eines semantischen Domains und eine darauf basierende Semantikabbildung ist nicht Teil dieses auf methodische Anwendung der UML ausgelegten Buchs. Dennoch wird in diesem Abschnitt das grundsätzliche Aussehen eines solchen semantischen Domains diskutiert, um damit den Beobachtungsbegriff im nächsten Abschnitt präzisieren zu können.

Um einer Menge von unterschiedlichen UML-Diagrammen eine präzise Semantik geben zu können, müssen in der Semantik alle wesentlichen Aspekte eines Systems dargestellt werden. Es ist nicht ausreichend, einzelne

Aspekte, wie das Ein-/Ausgabeverhalten oder die Inhalte einzelner Objekte im semantischen Domain zu modellieren. Stattdessen ist es sinnvoll, eine *geschlossene* Form eines Systems zu wählen und dessen Struktur und zeitliches Verhalten darzustellen. Wesentlichen Einfluss auf den semantischen Domain haben auch Fragestellungen, ob und in welcher Form Verteilung, Nebenläufigkeit und asynchrone Kommunikation repräsentiert werden sollen. In der in diesem Buch diskutierten Vorgehensweise werden solche Aspekte nur am Rand behandelt. Auch die in Kapitel 8 definierten Tests für verteilte Systeme und parallele Threads ersetzen echte Nebenläufigkeit durch simuliertes Scheduling und damit einem sequentiellen, deterministischen Ablauf.

Bereits [Huß97, Rum96] beschreiben die grundlegende Struktur solcher semantischen Domains, die auch als so genanntes *Systemmodell*, also einer abstrakten Darstellung der Struktur und des Verhaltens von Systemen, bezeichnet wird. Detailliert ausgeführt ist ein Systemmodell für die UML in [BCGR09a, BCGR09b]. Grundsätzlich ist eine solche mathematisch formale Darstellung inhaltlich sehr ähnlich zur Definition einer virtuellen Maschine, wie sie in Abschnitt 4.2 für die UML diskutiert wurde. Für die Definition einer virtuellen Maschine wird jedoch eine konstruktiv, operationelle Beschreibung angegeben, während ein Systemmodell als denotationelle Semantik im Allgemeinen kompakter definiert werden kann.

Ein für die UML/P adäquates Systemmodell beschreibt ein System über eine Menge von *Systemabläufen*, die ihrerseits *Interaktionen*, *Snapshots* und die darin enthaltenen *Objekte* charakterisieren. Abbildung 9.8 charakterisiert als Vereinfachung von [BCGR09a, BCGR09b] wesentliche Elemente, wobei vereinfachend auf unendliche Abläufe verzichtet wird und die eigentlich den Threads zugeordneten Stacks auf die Objekte verteilt werden.

9.3.3 Beobachtungsbegriff

Nach der Charakterisierung der Transformation einer Refactoring-Regel ist die zu erhaltende *Beobachtung* des Verhaltens wesentlich. In den beiden am meisten beachteten Werken zum Thema Refactoring [Fow99, Opd92] wird aber der Beobachtungsbegriff nicht präzisiert. In [Opd92, S. 28] wird der Beobachtungsbegriff auf die Relation zwischen Ein- und Ausgabe reduziert, ohne Interaktionen zu berücksichtigen. In [Fow99] wird an die intuitive Vorstellung der Beobachtung durch den Anwender appelliert. Als *Beobachtung* wird in XP-Projekten vor allem das an der Anwenderschnittstelle beobachtbare Verhalten verstanden. Die Schnittstellen zu anderen Systemen, Datenbanken, Frameworks, etc. gehören aber unter Umständen ebenfalls zum „extern beobachtbaren Verhalten".

Obwohl der Beobachtungsbegriff im XP-Ansatz nicht präzisiert wurde, gibt es eine Möglichkeit, Beobachtungen zu definieren, um damit das Refactoring eines Systems zu prüfen. Der XP-Ansatz nutzt dazu Testfalldefinitionen, die in Java formuliert werden und sich weitgehend auf die Prüfung des Ergebnisses in Form einer Nachbedingung beschränken.

Das **Systemmodell** beschreibt eine Menge von Abläufen eines Systems. Dazu werden folgende Definitionen eingeführt, wobei grundlegende Elemente wie die Menge der Attributnamen $VarName$ oder der Werte $Value$ nicht weiter detailliert werden.

- Ein *Objekt* $o = (ident, attr, stack)$ besitzt einen Identifikator $ident$, zu jedem Zeitpunkt eine Belegung $attr : VarName \rightarrow Value$ und dem ihm zugeordneten Anteil aus dem Stack. Obj sei die Menge der Objekte.
- Ein *Snapshot* $sn \subseteq Obj$ ist eine Sammlung von Objekten, die zu einem Zeitpunkt existieren. Die Links zwischen Objekten werden durch die im Snapshot eindeutigen Identifikatoren dargestellt. SN sei die Menge der Snapshots.
- Die Menge der Aktionen Act beschreibt Methodenaufrufe, Returns, Attributzuweisungen, etc.
- Aus einem Snapshot lässt sich erkennen, welches Objekt gerade aktiv ist und damit welche Aktion als nächstes durchgeführt wird. Der Programmzähler ist also aus dem $stack$ der Objekte abstrahierbar. Damit ist die nächste stattfindende Aktion eines Snapshots festgelegt: $act : SN \rightarrow Act$.
- Ein Ablauf $run \in SN^*$ ist eine Reihe von zeitlich aufeinander folgenden Snapshots.
- Das Systemmodell $SM \subseteq SN^*$ besteht aus einer Menge von Abläufen.

Eine Reihe von zusätzlichen Bedingungen sind notwendig, um SM auf die Abläufe einzuschränken, die tatsächlich auftreten können. Beispielsweise ist der Kontrollfluss zu wahren und nur Attribute im Objekt zu belegen, die dort auch existieren.
In Abbildung 9.5 wurde als abstrakte Zielsprache für eine Semantikdefinition Z eingeführt. Konkret kann $Z = SM$ gesetzt werden. Jedes UML-Artefakt $u \in UML$ erhält dann seine Semantik in Form einer Teilmenge von Systemabläufen aus SM, die die beschriebenen Eigenschaften erfüllen.

Abbildung 9.8. Prinzip eines Systemmodells als semantischer Domain

Die in den Kapiteln 6 und 8 diskutierten Tests und insbesondere ihre deskriptiven Bestandteile, wie Orakelfunktionen, Invarianten, Interaktionsmuster und Nachbedingungen, sind ein ideales Mittel zur Darstellung von Beobachtungen. Es ist daher sinnvoll, die Beobachtungen bei Refactorings durch in UML/P formulierte Testfälle zu modellieren. Anhand der aufgezählten Liste von Darstellungsformen ist ersichtlich, dass sich eine mit der UML/P formulierte Beobachtung nicht auf Schnittstellen beschränken muss, sondern auch interne Interaktionsmuster, Zwischenzustände und den Endzustand des Testlings „beobachten“ kann. Abbildung 9.9 illustriert dies auf Basis eines Systemablaufs bestehend aus einer einer Sequenz von Snapshots.

Die Möglichkeit, im Test jegliche Kapselung eines Testlings zu durchbrechen, birgt wesentliche Vorteile bei der Modellierung von Tests, da so nicht erst aufgrund des Ausgabeverhaltens Rückschlüsse auf den Zustand des Testlings geschlossen werden müssen, sondern der Zustand direkt zugänglich ist. Auch die Modellierung von Interaktionsmustern innerhalb einer Teilkomponente, die aus mehreren Objekten besteht, bricht die Kapselung der

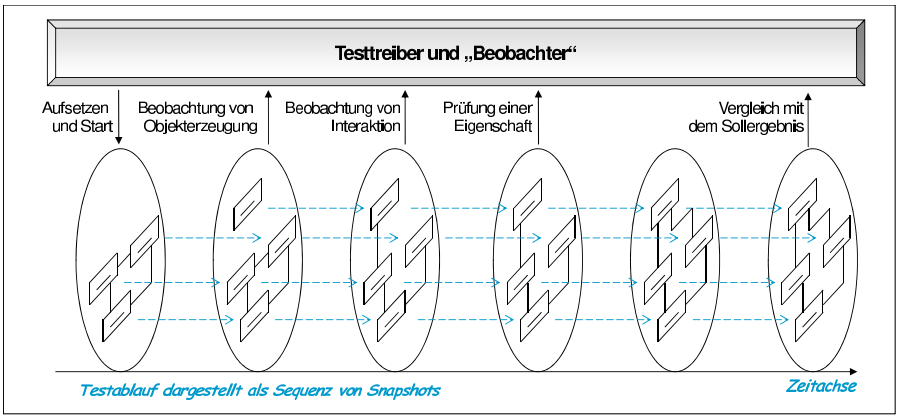


Abbildung 9.9. Test als Beobachtung eines Systemablaufs

Komponente auf. Der Nachteil solcher Tests besteht darin, dass diese auch kleine Änderungen des Testlings registrieren, indem sie entweder nicht mehr kompilierbar sind (zum Beispiel bei Signaturänderung) oder ein Scheitern des Testlaufs anzeigen (zum Beispiel bei Änderung des Interaktionsmusters). Dies bedeutet zusätzlichen Aufwand beim Refactoring, da diese Tests ebenfalls angepasst werden müssen.

Es ist daher bei der Definition von Tests sorgfältig abzuwägen, ob die Interna des Testlings oder eine abstraktere Programmierschnittstelle genutzt werden. In der Praxis sind zwei grobe Klassen von Tests identifizierbar. Die *Unit-Tests* für einzelne Methoden und Klassen werden normalerweise auf Interna zugreifen und müssen gemeinsam mit dem Code modifiziert werden. Vom Anwender formulierte und mithilfe von Entwicklern realisierte, automatisierte Tests sind hingegen Teil der Beobachtung durch einen Anwender. Derartige Tests sollten durch Refactorings nicht beeinträchtigt werden. Dies bedeutet aber, dass ein solcher Test möglichst gegen eine abstrakte Schnittstelle testet, die auch dann beibehalten wird, wenn Interna des Systems modifiziert werden. Im Detail bedeutet dies, dass es für Akzeptanztests besser ist, nach Möglichkeit

- Query-Methoden statt direkte Attributzugriffe zu verwenden,
- OCL-Eigenschaften zu verwenden, die erlauben gewisse Freiheiten zu formulieren, statt Attributwerte präzise vorzugeben,
- im Sollergebnis unwichtige Objekte und Attribute zu ignorieren und sich auf die wesentlichen Ergebnisse zu konzentrieren sowie
- nur wesentliche Interaktionen zu beobachten.

Auf diese Weise enthält die durch den Test definierte Beobachtung eine *Abstraktion* und erlaubt damit unterschiedlichen Abläufen, den Test zu erfüllen. Das System beziehungsweise sein Modell kann damit in gewissen

Grenzen modifiziert werden, ohne dass sich dadurch die abstrakte Beobachtung ändert. Dies kann wie in Abbildung 9.10 illustriert werden.

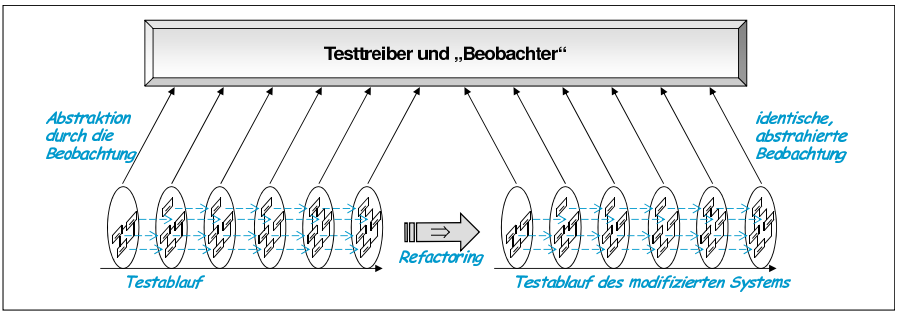


Abbildung 9.10. Refactoring lässt Systemabläufe unter Beobachtung invariant

Ein Nebeneffekt der Nutzung von Abstraktion bei der Beobachtung eines Testablaufs ist allerdings, dass ein Test nicht alle Aspekte des Testlings prüft. So kann ein Codestück zwar ausgeführt worden sein, sein Effekt aber durch den Test vernachlässigt werden. Als Konsequenz daraus ist die Aussagekraft von Überdeckungsmetriken für Tests, die auf Prüfung durchlaufenen Codes basieren, möglicherweise beschränkt. Hilfreich sind hier Mutationstests [Voa95, KCM00, Moo01], die prüfen, ob eine Änderung des Codes zu einer Erkennung veränderten Verhaltens durch die vorhandene Testsammlung führt. Damit wird gemessen, inwieweit die grundsätzlich abstrahierenden Beobachtungen einer Testsammlung in ihrer Gesamtheit das beobachtbare Verhalten erfassen.

Nach diesen aus der Praxis heraus motivierten und graphisch illustrierten Überlegungen zur Darstellung von Beobachtungen wird nun die im vorherigen Abschnitt begonnene Präzisierung von Modelltransformationen in Abbildung 9.11 um einen Beobachtungsbegriff erweitert. In dieser Abbildung wird außerdem ein Kontext für Transformationen eingeführt. Der Kontext besteht aus Modellen, auf die das transformierte Modell zum Beispiel durch Nutzung der darin definierten Typen aufbaut, die selbst aber nicht verändert werden. Ein Beispiel ist ein Klassendiagramm, das einem zu transformierenden Objektdiagramm zugrunde liegt.

Der dritte Punkt der Definition in Tabelle 9.11 drückt aus, dass eine Beobachtung in Form eines Tests den Testling zu bestimmten Systemabläufen zwingt und nur dort prüft. $Sem(u) \cap Sem(b)$ stellt entsprechend diese von beiden Modellen durchführbaren Abläufe dar. Entsprechend ist die *Beobachtungsinvarianz* nur bezüglich der durch $Sem(b)$ beschriebenen Abläufe notwendig. Dies gibt der Transformation die Freiheit, unbeobachtete, also typischerweise interne Modifikationen vorzunehmen.

Alternativ kann die Semantik von Beobachtungen auch durch die Einführung eines semantischen Domains B und einer Abstraktionsfunktion

Eine **Beobachtung** betrachtet nur einzelne Aspekte eines Systemablaufs. Eine Beobachtung ist damit eine Abstraktion:

- Eine *Beobachtung* besteht aus einem oder mehreren Artefakten der UML/P.
- Die Semantik einer Beobachtung ist die Teilmenge der durch die Beobachtung erlaubten Abläufe des Systems Z und damit ebenfalls durch $Sem : UML \rightarrow \mathbb{P}(Z)$ festgelegt.
- Sei $u \in UML$ ein Modell, das zum Beispiel zur konstruktiven Codegenerierung verwendet und durch $b \in UML$ beobachtet wird. Die Beobachtung von u bezieht sich dann nur auf die gemeinsamen Abläufe, dargestellt durch $Sem(u) \cap Sem(b)$.
- Eine Modelltransformation $T(u)$ auf dem Modell $u \in UML$ ist *beobachtungsinvariant* bezüglich einer Beobachtung $b \in UML$, wenn der beobachtete Ausschnitt identisch ist:
$$Sem(u) \cap Sem(b) \;=\; Sem(T(u)) \cap Sem(b)$$
- Wird die Modelltransformation auf mehrere Artefakte $A \subseteq UML$ angewandt und im Kontext anderer Modelle $K \subseteq UML$ betrachtet, so gilt die *Beobachtungsinvarianz* bezüglich einer Menge von Beobachtungen $B \in UML$, wenn gilt:
$$Sem(A) \cap Sem(K) \cap Sem(B) \;=\; Sem(T(A)) \cap Sem(K) \cap Sem(B)$$

In derselben Weise kann die in Abschnitt 9.3.1 diskutierte *Verfeinerung* in einen Kontext und relativ zu einer Beobachtung präzisiert werden:

$$Sem(A) \cap Sem(K) \cap Sem(B) \;\supseteq\; Sem(T(A)) \cap Sem(K) \cap Sem(B)$$

Bei einer *Abstraktion* T wird entsprechend die umgekehrte Relation $\subseteq$ genutzt.

Abbildung 9.11. Prinzip eines Beobachtungsbegriffs

$\beta : Z \rightarrow B$ beschrieben werden. Eine Beobachtung wird dann durch $b \in B$ repräsentiert und charakterisiert eine Äquivalenzklasse von Abläufen $\{z \in Z | \beta(z) = b\}$. Verändert also ein Refactoring einen Ablauf z nach z', so muss der beobachtbare Anteil jedoch gleich bleiben: $\beta(z') = \beta(z)$. Ein Nachteil dieses Ansatzes sind die Notwendigkeit zur Definition einer adäquaten Menge von Beobachtungen B.

Wie der letzte Punkt in Abbildung 9.11 zeigt, existiert formal kein Unterschied zwischen dem Kontext und den Beobachtungen. Ein solcher Kontext kann zum Beispiel aus unveränderbaren Schnittstellen zur GUI, Datenbanken, etc. bestehen. Er kann aber auch die von der aktuellen Bearbeitung nicht betroffenen Modelle beinhalten.

Ein Beispiel für eine Beobachtung ist etwa eine in OCL formulierte Methodenspezifikation. Ihre Semantik ist ein Prädikat über den Beschreibungen von Abläufen SM aus Abbildung 9.8. Ein Ablauf erfüllt die

Methodenspezifikation genau dann, wenn die Nachbedingung zum Ende jedes Methodenaufrufs gilt, bei dessen Beginn die Vorbedingung erfüllt war.[5]

Ein vollständiger Test, bestehend aus Testdatensatz, Testtreiber, etc., stellt ebenfalls ein Prädikat über einen Systemablauf dar. Ein Systemablauf erfüllt einen Test genau dann, wenn der Test erfolgreich durchgeführt wurde. Das heißt, es gibt in dem Ablauf einen Snapshot, der dem initialen Testdatensatz entspricht, der Testling wird ausgeführt und die geforderten Bedingungen und Interaktionen sind während beziehungsweise nach dem Test erfüllt.

9.3.4 Transformationsregeln

In der Theorie ist eine Transformationsregel als Abbildung $UML \rightarrow UML$ erklärt, die bei Bedarf auf Mengen von UML-Artefakten zur simultanen Anwendung erweitert werden kann. In der Praxis können jedoch unterschiedlichste Ausprägungen dieser Abbildung existieren. Die Anzahl der möglichen Regeln hängt von der syntaktischen Reichhaltigkeit der zugrunde liegenden Sprache ab. Die UML/P besitzt zwar deutlich weniger Sprachkonzepte als der UML-Standard [OMG10], ist aber immer noch eine eher große Modellierungssprache. Ausgehend von Erfahrungen mit Transformationskalkülen anderer Sprachen muss damit gerechnet werden, dass die Anzahl möglicher und sinnvoller Regeln mehr als linear mit der Größe der Sprache wächst. Ein Grund dafür ist, dass viele Regeln das Zusammenspiel mehrerer Sprachkonzepte behandeln. Es ist daher praktisch unmöglich, für die UML/P einen vollständigen Regelkalkül zu identifizieren. Dies ist aber auch für den praktischen Einsatz nicht notwendig. Wesentlich ist vielmehr, eine anwendbare Sammlung kompakter und einfacher Regeln zur Verfügung zu haben.

Die Anzahl und konkrete Form von Transformationsregeln hängt sehr oft von der Ausprägung der zugrunde liegenden Sprache ab. Aber es gibt auch allgemeine Prinzipien für Transformationsregeln, die weitgehend auf alle Sprachen angewandt werden können. Dazu gehören zum Beispiel die Expansion von Methoden oder die Migration von Attributen, die auch bei prozeduralen Sprachen wie C auf Funktionen und `struct`-Einträge angewandt werden können. Die Regelanwendungen unterscheiden sich jedoch in ihren technischen Details. Bei der Methodenexpansion sind in Java Sonderfälle für abstrakte Methoden, dynamische Bindung, statische Methoden oder Konstruktoren zu berücksichtigen oder die Exceptions sind speziell zu behandeln.

Die anwendbaren Regeln sollten möglichst einfach und generalisiert sein, um so maximale Anwendbarkeit sicherzustellen. Die Mächtigkeit eines Regelkalküls besteht zum Großteil aus der Komponierbarkeit der Regeln, indem diese etwa hintereinander angewandt werden. Mithilfe von

[5] Für die genaue Beschreibung der Semantik einer Methodenspezifikation siehe Abschnitt 3.4.3, Band 1.

zielgerichteten Taktiken können aus einfachen Regeln komplexe Transformationen komponiert werden. Damit lässt sich zum Beispiel die Einführung eines Entwurfsmusters aus [GHJV94] als Serie einfacher Transformationsregeln erklären [TB01].

Wesentlich ist dabei, dass für die grundlegenden Transformationsregeln Werkzeugunterstützung zur Verfügung steht, die auch die Kontextbedingungen prüft und die Wohlgeformtheit des Ergebnisses sichert. Zielgerichtete Taktiken können als Skripte analog zu der in Abschnitt 4.2.3 bereits für die Codegenerierung diskutierten Form realisiert werden.

Eine Reihe von Transformationsregeln sind außerdem nur in Anwesenheit bestimmter Stereotypen anzuwenden. In Band 1 ist beispielsweise demonstriert, wie Transitionen mit überlappenden Schaltbereichen unterschiedlich priorisiert sein können und dementsprechend verschiedene Regeln anwendbar sind. Weil aber die in UML/P verfügbaren Stereotypen mit dem in Abschnitt 2.5.3, Band 1 beschriebenen Verfahren frei erweitert werden können, ist es notwendig, gemeinsam mit der Einführung eines neuen Stereotyps entsprechende Transformationsregeln und Skripte zu definieren, die einen spezialisierten Umgang mit Modellen mit diesem Stereotyp erlauben.

9.3.5 Korrektheit von Transformationsregeln

Wie bereits in den vorherigen Abschnitten anhand von Beispielen illustriert, besitzt eine Transformationsregel meistens Kontextbedingungen, die erfüllt sein müssen, um die Korrektheit einer Transformation zu sichern. Diese Kontextbedingungen können verschiedener Bauart sein, weshalb eine Klassifizierung von Transformationsregeln anhand der Art der Kontextbedingungen sinnvoll ist.

Die Kontextbedingungen reichen von einfachen und meistens syntaktisch prüfbaren Einschränkungen bis hin zu komplexen, nicht mehr automatisch entscheidbaren Invarianten.

1. Im einfachsten Fall besitzt eine Transformation keine Kontextbedingungen.
2. Einfache syntaktische Bedingungen wie zum Beispiel, dass ein zu ersetzender Ausdruck eine Variable nicht verwendet, können durch entsprechende Prüfungen automatisiert werden. Diese Form der Kontextbedingungen tritt häufig auf und kann durch eine gute Werkzeugunterstützung anhand des Syntaxbaums effizient geprüft werden.
3. Komplexere Kontextbedingungen wie etwa die *Typkorrektheit* lassen sich ebenfalls anhand der Syntax entscheiden, erfordern aber erheblich mehr Aufwand. Weitere Beispiele für solche Bedingungen sind *Kontrollflussanalysen*, zum Beispiel um die Unerreichbarkeit von Zuständen im Statechart oder von Anweisungen im Methodenrumpf zu identifizieren, oder *Datenflussanalysen*, um sicherzustellen, dass Variablen vor ihrer Nutzung belegt werden, wie sie beispielsweise in modernen Compilern integriert sind.

4. Nicht automatisiert überprüfbare Bedingungen sind meist komplexere Beziehungen zwischen Elementen des Systems. Beispielsweise können mehrere Attribute einer Klasse in einem inneren Zusammenhang stehen, der durch eine OCL-Bedingung formulierbar ist. Auf Basis dieses Zusammenhangs kann ein Attribut gegebenenfalls durch ein anderes ersetzt werden. Die Korrektheit von OCL-Bedingungen ist aber im Normalfall nicht automatisch prüfbar, sondern erfordert punktuelle Tests oder interaktive Verifikation.

Die Kategorie der syntaktisch prüfbaren Kontextbedingungen wird im Compilerbau typischerweise in die Unterkategorien (einfache, kontextfreie) syntaktische und (komplexere, später durchgeführte) semantische Analyse getrennt. Beide Formen werden aber auf Basis der Syntax vorgenommen und werden automatisiert durchgeführt.

Für manche Fragestellungen existiert nur ein semi-entscheidbares Verfahren, bei dem unter Umständen die Gültigkeit der Kontextbedingung nicht entschieden werden kann. In diesem Fall wird die Kontextbedingung bereits zurückgewiesen, wenn sie nicht positiv entschieden werden konnte. Dabei spielt fast immer die bereits bei der Entwicklung von Testfällen in Kapitel 7 diskutierte Problematik der Unentscheidbarkeit der Erfüllbarkeit boolescher Aussagen oder eine praktisch nicht mehr immer berechenbare, exponentielle Komplexität bei der Entscheidungsfindung eine Rolle.

Mehrere oft auftretende Rahmenbedingungen sind bereits aus anderen Ansätzen zur transformationellen Softwareentwicklung bekannt:

Terminierung. Eine Kontextbedingung kann fordern, dass die Berechnung eines Ausdrucks immer *terminiert*. Auch eine Exception ist eine Terminierung. Wie bereits in Kapitel 3, Band 1 diskutiert, ist die Terminierung durch Tests insbesondere mit gegebenen Schleifen-Invarianten und Terminierungsbedingungen relativ einfach prüfbar, obwohl sie im Prinzip unentscheidbar ist. Für praktisch relevante Transformationen kann aber davon ausgegangen werden, dass jeder Ausdruck terminiert oder die zur Verfügung stehenden Tests eine Nichtterminierung entdecken.

Definiertheit. Eine Berechnung ist *definiert*, wenn sie immer terminiert und dabei ein normales Ergebnis, also keine Exception erzeugt.

Determiniertheit. Eine Berechnung ist *determiniert*, wenn sie immer terminiert und dabei ein eindeutiges Ergebnis produziert. Dies kann durchaus eine Exception sein. Wesentlich ist, dass bei der Berechnung kein Zufallselement auftritt oder sich zumindest nicht auf das Ergebnis auswirkt. Diese Bedingung kann zum Beispiel durch Einbeziehung von Zeitabfragen verletzt werden. Wie in Abschnitt 3.3.4, Band 1 an der Konversion von Mengen in Listen mit dem OCL-Operator `asList` diskutiert, ist das Ergebnis dieses Operators zwar eindeutig, aber dem Entwickler nicht a priori bekannt. Der Vorteil dieser Festlegung ist, dass einerseits ein Ausdruck der Form `set.asList` determiniert ist, andererseits aber einem OCL-Interpreter die konkrete Umsetzung überlassen bleibt.

Seiteneffektfreiheit. Ein Seiteneffekt einer Berechnung ist eine permanente Zustandsänderung der vorhandenen Objektstruktur, indem zum Beispiel eine lokale Variable, ein Attribut oder ein Link verändert wurde. Die Erzeugung neuer Objekte ist, wie in Abschnitt 3.4.1, Band 1 besprochen, nur dann ein Seiteneffekt, wenn dieses Objekt von der ursprünglichen Objektstruktur aus zugänglich gemacht wird.

Kontextbedingungen, die semantische Äquivalenzen beinhalten, sind oft unentscheidbar. Zum Beispiel ist bei der Ersetzung eines Ausdrucks durch einen anderen, wie in der Beispielregel in Abschnitt 9.1, deren Gleichheit nicht automatisiert prüfbar. Die Darstellung einer solchen Eigenschaft erfolgt beispielsweise durch OCL-Bedingungen. Diese Bedingungen können daher nur für *Tests* oder für die *Verifikation* eingesetzt werden. Während Tests keine Gewissheit über die Korrektheit einer OCL-Bedingung geben, sind sie doch effizienter zu bewerkstelligen als die tatsächliche Verifikation.

Für die Verifikation einer solchen Invariante ist es meistens notwendig, den Code mit weiteren Invarianten zu versehen und ähnlich der Hoare-Logik alle Einzelschritte zu verifizieren (eine Java-Variante ist zum Beispiel in [vO01] zu finden). Für Systeme höchster Qualität oder besonders kritische Bereiche, kann dies insbesondere in Kombination mit Tests sinnvoll sein. Durch Tests werden zunächst vorhandene Fehler erkannt und eliminiert. Mit Verifikationstechniken wird dann die vollständige Korrektheit bewiesen und jedes Restrisiko einer fehlerhaften Invariante ausgeschaltet. Durch die Vorschaltung der Tests kann Verifikationsaufwand für viele der fehlerhaften Aussagen eingespart und so effizienter vorgegangen werden.

Für viele Systeme wird aber die Verwendung von Tests ausreichend sein. Wie in Abschnitt 10.2 anhand einer Vorgehensweise für Datenstrukturwechsel gezeigt, können Tests nicht nur als Indikator für die Korrektheit eines Systems, sondern auch für die Korrektheit einer Transformation eingesetzt werden.

9.3.6 Ansätze der transformationellen Softwareentwicklung

Einige Ansätze transformationeller Softwareentwicklung sowie eine interessante Diskussion über dessen Auswirkungen sind in [Pep84, Kap. 5] enthalten. Darin werden unter anderem die Fragen nach der Semantik, der Nützlichkeit von Top-Down-Darstellungen einer Softwareentwicklung und der Sprachunabhängigkeit von Transformationstechniken diskutiert.

Transformationelle Softwareentwicklung

Insbesondere in der theoretischen Informatik wurden bereits eine Reihe von transformationellen und auf Verfeinerungskonzepten basierende Ansätze vorgestellt. Dazu gehören zum Beispiel Arbeiten von Dijkstra [Dij76], Wirth [Wir71], Bauer [BW82], Back [BvW98] und Hoare [HHJ+87]. CIP-L [BBB+85]

ist zum Beispiel eine Sprache, die einen algebraischen Spezifikationsstil sowie funktionale, algorithmische und prozedurale Programmierstile in sich vereint und durch zahlreiche transformationelle Schritte von einem in den nächsten Sprachstil überleiten kann. Als Methodik wurde diesem Top-Down-Transformationsansatz zugrunde gelegt, dass zunächst in einer abstrakten Spezifikationssprache modelliert, dann in eine funktionale Sprache transformiert und letztendlich mit dem Ziel einer prozeduralen Implementierungssprache optimiert wird. Elemente dieses Ansatzes transformationeller Softwareentwicklung sind auch im heutigen, an der inkrementellen Vorgehensweise orientierten Refactoring wieder zu finden. Dazu gehört zum Beispiel das Konzept, Optimierungen am Code erst möglichst spät durchzuführen, wenn die Korrektheit geklärt und die Stabilität der Funktionalität gesichert sind. In [BBB+85] wurde wie auch in verwandten Ansätzen die Verifikation als Mechanismus zur Sicherung der Korrektheit einer Transformation verwendet. Diese wird im hier vorgeschlagenen Ansatz durch die weniger aufwändigen Tests abgelöst.

Der Ansatz zur Spezifikation und Transformation von Programmen in [Par90] enthält ebenfalls eine detaillierte Sammlung von Regeln zur transformationellen Softwareentwicklung für abstrakte, durch algebraische Gesetze definierte Datentypen, funktionale und imperative Programme sowie von Datenstrukturen. Dort werden zum Beispiel die Entfernung überflüssiger Zuweisungen und Variablen, die Umordnung von Anweisungen, die Behandlung von Kontrollstrukturen oder verschiedene Varianten der Komposition von Funktionen diskutiert, die teilweise eine direkte Entsprechung in [Fow99] finden. Darüber hinaus bietet [Par90] wie auch [BBB+85] Techniken zur inkrementellen Verfeinerung einer Spezifikation in Richtung auf eine operationelle Implementierung.

Algebraische Spezifikation

In den algebraischen Spezifikationstechniken wurde als erstes die Definition expliziter Beobachtungen eingeführt. Mithilfe des *Versteckens von Sorten* hat zum Beispiel OBJ [FGJM85] einen Mechanismus angeboten, Details eines algebraisch spezifizierten abstrakten Datentypen zu kapseln und eine explizite nutzbare und beobachtbare Schnittstelle zur Verfügung zu stellen. Weitere algebraische Ansätze [ST87, BHW95, GR99, BFG+93] demonstrieren, dass es möglich ist, explizit *extern sichtbares Verhalten* zu definieren und darauf rigorose Beweistechniken anzusetzen. [BBK91] enthält eine generelle Übersicht über Ansätze zur Definition von Beobachtbarkeit in algebraischen Spezifikationen.

Wie bereits diskutiert, ist es ein gewisser Nachteil des hier verwendeten, aber dafür sehr flexiblen Testansatzes, dass die Beobachtung und damit auch die beobachtete Schnittstelle durch die Tests nur implizit und für jeden Test anders definiert ist. Es erfordert daher die Disziplin des Testentwicklers

insbesondere bei Akzeptanztests möglichst auf stabile und wie bei den algebraischen Spezifikationen explizit „publizierte“ Schnittstellen zuzugreifen.

Refactoring und Verifikation

In [Sou01] werden Refactoring und Verifikation in Beziehung gesetzt. In diesem Sinne wird zunächst die Verifikation mittels einer unter Umständen interaktiv erstellten Sammlung von Beweisen als wesentliches Element zur Sicherstellung der Korrektheit eines Systems eingesetzt. Die Weiterentwicklung des Systems mithilfe kleiner, systematischer Schritte führt dann dazu, auch die Beweise entsprechend zu adaptieren und deren Korrektheit durch automatische Wiederholung sicherzustellen. Durch adäquate Werkzeugunterstützung, wie sie zum Beispiel Isabelle [NPW02] mit den teilweise sehr mächtigen Beweistaktiken bietet, kann so eine evolutionäre Weiterentwicklung unter Wiederverwendung von Verifikationsanteilen vorgenommen werden.

Transformation graphischer Spezifikationen

Eine Reihe von Arbeiten zeigt, dass für graphische Spezifikationen, unabhängig davon, ob sie Struktur-, Verhaltens- oder Interaktionssichten eines Systems darstellen, ebenfalls transformationelle Techniken entwickelt werden können. Der in [BS01b] beschriebene Ansatz *Focus* demonstriert die Kombinierbarkeit formaler, textbasierter Spezifikationstechniken mit einer graphischen Repräsentation der verteilten Interaktion von Komponenten. Darin stehen präzise Techniken zur Dekomposition von Komponenten und Kanälen und zur Verfeinerung von Verhalten und Schnittstellen bereit, deren Auswirkungen an graphischen Modellen geplant und studiert werden können.

In diesem Kontext wurde in [PR97, PR99] eine Technik zur Glas-Box-Transformation der inneren Struktur eines verteilten Systems vorgestellt, dessen an der Schnittstelle beobachtbares Verhalten bei der Transformation äquivalent bleibt oder verfeinert wird. Ein Teil dieser Transformationstechnik basiert auf der Verhaltensverfeinerung innerer Komponenten, die zum Beispiel mit Zustandsautomaten beschrieben werden können [Rum96].

Dass diese Transformationsformen nicht nur für massiv verteilte oder Hardware-nahe Systeme geeignet sind, zeigt [RT98] in der Geschäftsprozesse durch strukturelle Transformationen optimiert werden.

Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das semantikerhaltende *Refactoring* auf einem durch eine *Testsammlung* basierenden *Beobachtungsbegriff* basiert. Zwei Verallgemeinerungen, der Transformation von Modellen, die

Abstraktion und insbesondere die *Verfeinerung* könnten nicht nur zur Restrukturierung der vorhandenen Systembeschreibung, sondern auch zur transformationellen Weiterentwicklung dienen. Ansätze wie die in Abschnitt 9.3.6 beschriebenen [BBB+85, Par90] haben dies gezeigt. Praktisch anwendbar werden transformationelle Entwicklungsschritte aber vor allem durch die Existenz *automatisierter Tests*.

9.3.7 Transformationssprachen

Um Transformationen der genannten Arten flexibel einsetzen zu können, ist eine eigenständige Sprache für die Definition von Transformationen notwendig. Nur so können Transformationen explizit definiert werden.

So werden in der Mathematik Ersetzungsregeln in Form von Gleichungen definiert. Die Gleichungssprache der Mathematik ist damit auch für die Definition von Ersetzungen nutzbar. In den formalen Methoden werden Ersetzungsregeln unter anderem benutzt, um Typisierungsregeln in Form eines Kalküls anzugeben, wie in CIP [BBB+85, BEH+87], um algebraische Umformungen von textuellen Programmier- und Spezifikationssprachen zu definieren oder wie in Isabelle [NPW02, Pau94], um Theoreme mit Anwendungsbedingungen als anwendbare Transformationen anzugeben. Die Ersetzungsregeln der Mathematik sind Teil der „Mathematischen Sprache“ selbst, während die Kalkülsprachen von Isabelle/HOL oder CIP jeweils eigene Teilsprachen darstellen, die mit der transfomierten Basissprache harmonisch zusammenpassen.

Graph Grammatiken [Nag79, NS91] bilden als Analogon zu textuellen Grammatiken zunächst die Möglichkeit Graphstrukturen zu definieren und eignen sich besonders, um die typischerweise (im mathematischen Sinn) als Graphen definierte Struktur vom UML-Modellen in Werkzeugen zu speichern. Transformationen für Graphen können darauf aufsetzend zum Beispiel mittels Graphersetzungssystemen [Sch88, Sch91, LMB+01], algebraischen Ansätzen [EEPT06, Tae04] oder einer Notation zu ihrer Steuerung mittels Fujaba's „Story Diagrams“ [FNTZ00] definiert werden. Das Graphersetzungssystem PROGRES [Sch91, Zün96] beinhaltet nicht nur Graphmatching-Techniken, sondern auch eine komplexe Steuerung zur Ausführung und zum Backtracking von Ersetzungsregeln. Das Konzept der Triple Graph Grammars [Sch94] erlaubt auch die Transformation von Graphen zwischen unterschiedlichen Strukturen, so dass damit auch eine Übersetzung zwischen Modellen verschiedener Sprachen möglich wird (etwa von Automaten zu Java).

Ein weiterer Ansatz zur Definition von Transformationen auf Modellen nutzt Metamodelle in Form vom Objektstrukturen. Hier werden Klassendiagramme ähnlich wie in Kapitel C, Band 1 eingesetzt, um die abstrakte Syntax zu definieren. Auf den dadurch definierten Objektstrukturen lassen sich dann Transformationen auf der abstrakten Syntax unter Umgehung der konkreten, für den Nutzer lesbaren Repräsentation der Modelle definieren.

Transformationssprachen wie ATL [JK05], MOLA [KCS05], BOTL [MB03] oder die Epsilon Transformation Language [KRP11] nutzen diesen Ansatz, der häufig auf EMF [SBPM08] basiert. In [CH06] findet sich eine gute Klassifikation über diese Art von Transformationssprachen. Die OMG hat unter dem Namen „Query View Transformation (MOF QVT)“ eine Spezifikation für solche Transformationssprachen definiert [OMG08] auf der mittlerweile auch Graphersetzungssysteme wie MOFLON [AKRS06, WKS10] aufbauen.

Während Metamodelltechniken aber auch manche Graphtransformationsansätze [LKAS09] vor allem auf die generische, sprachunabhängige Definition von Transformationen setzen, versuchen andere in Analogie zur Mathematik eine möglichst nahe an der zugrundeliegenden Modellierungssprache ausgerichteten Transformationssprache zu entwickeln [BW06, Grø09a, RW11]. Der Vorteil einer Transformationssprache auf Basis der konkreten Syntax besteht darin, dass der Anwender sich leichter in eine solche Transformationssprache hinein findet und diese daher eher nutzt, als wenn ihm diese Transformationssprache völlig unbekannt ist oder er sich mit der abstrakten Syntax der von ihm benutzten Modellierungssprachen auseinander setzen muss.

Die Auswahl einer geeigneten Transformationssprache und dazu gehörender Werkzeuge zur Definition von Refactorisierungsschritten ist notwendig, um die im nachfolgenden Kapitel 10 behandelten Transformationen festzulegen. Wesentliche Einflussfaktoren sind hier natürlich auch die bereits bisher eingesetzten Werkzeuge.