

# Semantische Modellierung von Maßnahmen als Transaktionen auf den Entitäten virtueller 3D-Stadtmodelle

MAXIMILIAN SINDRAM & THOMAS H. KOLBE<sup>1</sup>

*Zur Planungs- und Entscheidungsunterstützung in der Stadtentwicklung stehen heute Simulationssysteme bereit, die semantische 3D-Stadtmodelle als gemeinsame Informationsbasis und integrierende Datendrehscheibe verwenden. Neben den physischen Entitäten einer Stadt sind vor allem Transformationsprozesse von Bedeutung, die sich aufgrund der Durchführung geplanter Maßnahmen ergeben. Mögliche Maßnahmen werden oftmals in Gesetzestexten formuliert und definieren den Handlungsrahmen für die an der Planung beteiligten Akteure. Mit Hilfe eines semantischen 3D-Stadtmodells können die durch die ortsspezifische Anwendung von Maßnahmen zu erwartenden Auswirkungen abgeschätzt werden, wenn es gelingt, die von den Maßnahmen zu erwartenden Veränderungen der Realität durch Modifikationen der virtuellen Realität vorwegzunehmen und zu analysieren. Dazu müssen jedoch die in Gesetzestexten und Regelungen beschriebenen Maßnahmen maschinell interpretierbar gemacht und auf spezifische Objekte des 3D-Stadtmodells bezogen werden. In diesem Beitrag wird eine Ontologie zur formalen Repräsentation von Maßnahmen als komplexe Transaktionen auf den Entitäten semantischer 3D-Stadtmodelle vorgestellt. Dadurch wird ein einheitliches Modell geschaffen, das es einem Planer ermöglicht, das virtuelle Abbild der Stadt auf der Basis von gesetzes- oder regelungsspezifischen Maßnahmen zu manipulieren und unter Optimierungsaspekten hinsichtlich von Key Performance Indicators (KPIs) zu gestalten. Maßnahmen werden von ihrer prototypischen Repräsentation, in der sie keinen direkten Bezug zu den Entitäten des Stadtmodells besitzen, durch Instanziierung mit konkreten Parametern der Stadtobjekte zu spezifischen Maßnahmen. Sie können die Repräsentation der 3D-Stadtobjekte verändern und berechnen den in der Realität benötigten Ressourcenaufwand wie anfallende Kosten, Zeit und materielle Aufwände. Der Formalismus bezieht sich auf die durch den internationalen Standard GML vorgegebenen Objekte und wird in diesem Beitrag auf der Grundlage des Anwendungsschemas CityGML beschrieben. In dem Beitrag wird zudem erläutert, wie komplexe Maßnahmen, Reihenfolgebeziehungen und bzgl. der Veränderung von KPIs kohärente oder widersprechende Maßnahmenpakete erkannt bzw. abgebildet werden können.*

## 1 Einleitung und Problemstellung

Unter dem Begriff der Urbanisierung werden die Herausforderungen, die Städte in Zukunft meistern müssen, zusammengefasst. Sie sind geprägt von einer stets zunehmenden Bevölkerungsdichte auf Grund der anhaltenden Land-Stadt-Flucht zusammen mit einer Ausdehnung des ursprünglichen Stadtgebiets. Folglich muss das komplexe System Stadt an die neuen Gegebenheiten und veränderten Strukturen angepasst werden. Zusätzlich müssen globale und regionale Interessen wie die Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes oder die Aufwertung von sozial benachteiligten Wohnsiedlungen geplant und in nachhaltiger Weise umgesetzt werden.

Zu diesem Zweck werden Gesetze und Verordnungen formuliert, die vorgeben, mit welchen Maßnahmen diese Ziele erreicht werden sollen bzw. können. Diese Texte können zwar sehr gut

---

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Geoinformatik, Technische Universität München, Arcisstr. 21, 80333 München  
maximilian.sindram@tum.de, thomas.kolbe@tum.de

von Menschen verstanden werden, Computersysteme benötigen jedoch eine streng formale Repräsentation dieser Vorgaben, um in Simulationsläufen komplexe Szenarien zu berechnen. Abbildung 1 illustriert, dass der Grad der Formalisierung von informellen politischen Texten über Verordnungen bis hin zu einer formalen Ontologie für Maßnahmen steigt.

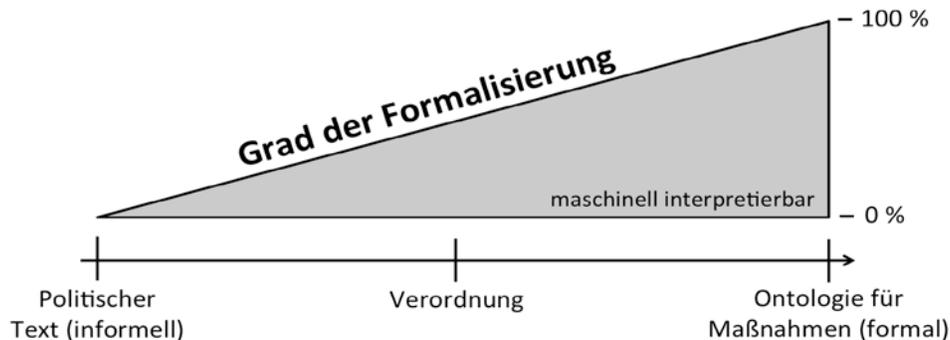


Abb.1: Grad der Formalisierung von informellen politischen Texten über Verordnungen bis hin zu maschinell interpretierbaren Ontologien.

Im Planungsprozess ist es von entscheidender Bedeutung, zuverlässige Unterstützungssysteme zur Beantwortung offener Fragen im urbanen Kontext und zur Evaluierung geplanter Szenarien zu haben. Dazu setzen Stadtplaner und Entscheider vermehrt auf semantische 3D-Stadtmodelle als Drehscheibe und Informationsbasis für die am Planungsprozess beteiligten Simulationsmodelle (vgl. KADEN & KOLBE 2013, KADEN et al. 2013). Der Vorteil gegenüber konventionellen Ansätzen, die beispielsweise das Simulationsgebiet in ein symmetrisches Raster mit einer Kantenlänge von 1 km einteilen und dieses als kleinste Bezugseinheit verwenden (vgl. KOPPELAAR et al. 2013), besteht darin, dass die Entitäten virtueller 3D-Stadtmodelle diskrete, virtuelle Vertreter realer Objekte der Stadt sind. Für rechnergestützte Simulationen werden räumlich und thematisch differenzierbare Objekte benötigt. Die Geometrie der Stadtobjekte und deren Erscheinung sagt jedoch unmittelbar nichts über deren Bedeutung aus. Durch die thematische Zerlegung der Stadt und die Attributierung der Objekte wird diese Lücke geschlossen. Somit beziehen sich alle am Planungsprozess beteiligten Simulationsmodelle auf eine einheitliche Datenbasis mit einem der Realität entsprechenden Verständnis der Zerlegung der Stadt in seine Bestandteile. Semantische 3D-Stadtmodelle werden zunehmend von den Städten oder Landesbehörden erstellt und amtlich geführt und bilden somit eine qualitativ zuverlässige und nachhaltige Datenquelle für die integrative Stadtssystemmodellierung.

Die aktuell etablierten Ontologien (CityGML, IFC) zur Beschreibung semantischer 3D-Stadt- und Bauwerksmodelle ermöglichen die Repräsentation von statischen Stadtzuständen zu festen Zeitpunkten. Es gibt keine standardisierte und formale Möglichkeit, bi- oder multilaterale Transformationsprozesse zwischen den Entitäten der Stadt zu modellieren und somit in Simulationen zu verwenden. Bisher sind zwar Transaktionen im Sinne von Datenbanktransaktionen auf den Entitäten der Stadtmodelle möglich. Es gibt jedoch kein Konzept, welches es erlaubt, städtische Transformationsprozesse auf komplexe Transaktionen auf den Entitäten in 3D-Geodatenbanken oder Geoinformationssystemen abzubilden und diese formal zu modellieren. In diesem Beitrag

wird das Konzept zur semantischen Modellierung von Maßnahmen erstmalig vorgestellt und auf Basis des Anwendungsschemas CityGML (vgl. KOLBE 2009, GRÖGER et al. 2012) beschrieben.

## 2 Definition und Eigenschaften von Maßnahmen im urbanen Kontext

Unter Maßnahmen im urbanen Kontext werden alle vom Menschen mit Absicht durchgeführten Prozesse verstanden, die eine geometrische oder attributive Zustandsänderung der Stadt oder deren Bestandteile bewirken. Es müssen zwei Zustände von Maßnahmen unterschieden werden: Prototypische Maßnahmen geben als teilinstanzierte Objekte einen allgemeinen Rahmen vor, der noch in keiner direkten Verbindung mit spezifischen Objekten der Stadt steht. In ihnen werden Transformationsregeln bzw. Operationen allgemeingültig definiert. Zusätzlich werden Bedingungen formuliert, die für eine erfolgreiche Durchführung der Maßnahme erfüllt werden müssen. Diese Bedingungen beziehen sich sowohl auf Eigenschaften, die von den Eingangsdaten erfüllt werden müssen als auch auf die erwünschten Ergebnisse, die mit der Umsetzung der Maßnahme erzielt werden sollen. Erst durch die Anreicherung prototypischer Maßnahmen mit spezifischen Parametern aus den Entitäten des virtuellen Stadtmodells werden sie zu spezifischen Maßnahmen. Abbildung 2 zeigt, dass die Struktur der Maßnahme in beiden Zuständen erhalten bleibt. Durch die Instanziierung der prototypischen Maßnahmen werden sie auf das konkrete Stadtobjekt angewandt.

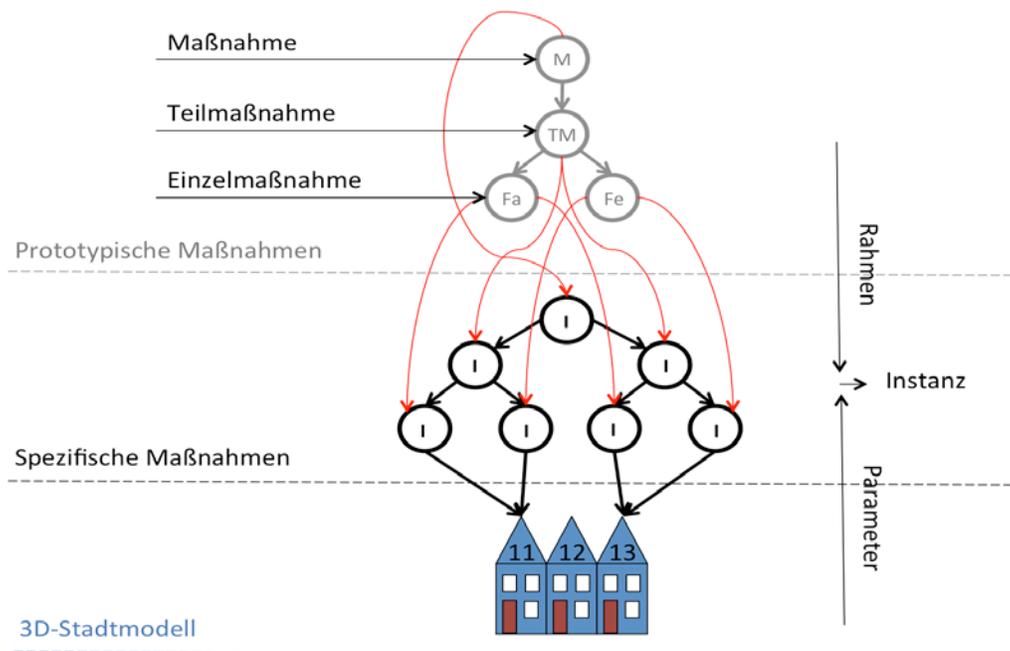


Abb. 2: Unterscheidung zwischen prototypischen Maßnahmen und spezifische Maßnahmen. (M = Maßnahme, TM = Teilmaßnahme, Fa (Fassadendämmung) und Fe (Fenster austausch) = Einzelmaßnahmen ohne weitere Zergliederung, I = Spezifische Maßnahme bzw. vollinstanzierte Maßnahme)

In Abbildung 2 wird illustriert, dass Maßnahmen (M) aus Teilmaßnahmen (TM) bestehen können. Eine Maßnahme könnte ein politisches Instrument sein, welches Baumaßnahmen zu energetischen Gebäudesanierungen mit einer Gesamtsumme von 1 Mrd. Euro fördert. Diese noch sehr

allgemein formulierte Maßnahme setzt sich exemplarisch aus einer Teilmaßnahme zur Sanierung des Bauwerks zusammen, die wiederum aus zwei Einzelmaßnahmen besteht. Eine dieser Maßnahmen könnte eine Fassadendämmung (Fa) sein, durch die ein Dämmmaterial auf die Wandfläche eines Gebäudes aufgebracht wird und somit der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) verbessert wird. Die zweite Einzelmaßnahme könnte eine Fenstersanierung (Fe) sein, die im Falle von verbauten Doppelglasfenstern diese durch Fenster mit einer Dreifachverglasung austauscht. Da diese Maßnahmen noch keinen Bezug zu konkreten Gebäuden in einer Straße besitzen und allgemeingültig modelliert sind – man könnte auch von teilinstanziierten Maßnahmen sprechen – ist ihr Status prototypisch. Erst durch die Instanziiierung mit Parametern aus den Gebäuden des 3D-Stadtmodells werden sie zu spezifischen Maßnahmen. In dem illustrierten Beispiel in Abbildung 2 wurden die Maßnahmen zur Fassadendämmung und zur Fenstersanierung auf die Gebäude mit der Hausnummer 11 und 13 angewandt. Das Gebäude Nummer 13 hingegen wurde aufgrund von Denkmalschutzaufgaben ausgelassen.

Folgende Auflistung beschreibt die wesentlichen Bestandteile, aus denen sich Maßnahmen zusammensetzen:

### **Leistungskennzahlen bzw. Key Performance Indicators (KPIs)**

Maßnahmen verfolgen stets ein konkretes Ziel, welches durch eine entsprechende Veränderung von Leistungskennzahlen bzw. Key Performance Indicators (KPIs) definiert wird. Diese Ziele können unterschiedlicher Natur (ökologisch, energetisch, monetär, kulturell) sein und sind entweder politisch, ökonomisch oder persönlich motiviert. Gerade für energetische Simulationen sind diese Schlüsselindikatoren von entscheidender Bedeutung (vgl. KRÜGER & KOLBE 2012).

### **Kategorisierung von Maßnahmen**

Maßnahmen lassen sich in drei unterschiedliche Kategorien hinsichtlich ihrer Wirkungsweise einteilen. Neben Maßnahmen, die das Stadtsystem oder deren Bestandteile um etwas Neues erweitern (Beispiel: Planung und Bau eines neuen Blockheizkraftwerks) können Maßnahmen bestehende Objekte verändern (Beispiel: Fassadensanierung aller Gebäude in einer Straße). Die Entfernung einer alten Fernwärmeleitung steht für die dritte Kategorie von Maßnahmen, durch deren Umsetzung Objekte aus dem Stadtmodell entfernt werden.

### **Relationen zwischen Maßnahmen**

Maßnahmen können sich aus weiteren Teilmaßnahmen zusammensetzen, die zwar ein gemeinsames Ziel verfolgen, sich jedoch auf unterschiedliche Stadtobjekte oder deren Bestandteile beziehen. Eine Maßnahme, die eine energetische Sanierung eines Gebäudebestandes vorsieht, besteht beispielsweise aus einer Maßnahme zur Fassadensanierung, einer weiteren Maßnahme zur Modernisierung der Heizanlage und einer Maßnahme zur Installation einer Photovoltaikanlage auf dem Dach. Alle Einzelmaßnahmen zusammen werden zu einer übergeordneten Maßnahme zusammengefasst.

Maßnahmen können gegensätzliche Ziele verfolgen. Das bedeutet, dass sich eine oder mehrere Leistungskennzahlen in unterschiedliche Richtungen verändern. So kann eine Fassadensanierung im Widerspruch zu einer Denkmalschutzmaßnahme stehen, die die ursprüngliche Ansicht einer Fassade erhalten will. Es ist möglich, dass Maßnahmen miteinander konkurrieren und zwar dann, wenn sie dieselben Ressourcen beanspruchen. Zur Anbringung einer Solarthermie- und einer Photovoltaik-Anlage auf dem Dach steht nur eine begrenzte Fläche zur Verfügung. Um jedoch eine optimale Ausbeute hinsichtlich des Energiebedarfs zu erzielen, müssen die Ergebnisse beider Maßnahmen gegeneinander abgewogen werden. Maßnahmen können sich ergänzen. Der Ausbau von Radwegen und die Einführung von Auto-freien Zonen führen beide zu einem verringerten CO<sub>2</sub>-Ausstoß in der betroffenen Region.

### **Bezugsebenen von Maßnahmen**

Maßnahmen lassen sich auf unterschiedliche Bezugseinheiten anwenden. Diese Bezugseinheiten reichen von administrativen oder statistischen Gebietsgrenzen auf unterschiedlichen Skalen bis hin zu konkreten Objekten wie Gebäude oder Gebäudeteile der 3D-Stadtmodelle. Diese Grenzen werden zum einen durch die Verfügbarkeit der Eingangsdaten und zum anderen durch den Grad der Konkretisierung der Maßnahmen bestimmt. Jedoch kann sich eine Maßnahme, die ohne eine feste Zuordnung zu einem bestimmten Gebäude formuliert worden ist, in ihrer virtuellen Umsetzung - sie wird somit zu spezifischen Maßnahme - auf dieses beziehen. Zum Beispiel sei eine Maßnahme zur Förderung von Photovoltaikanlagen für eine Gemeinde mit einem Investitionsvolumen von 3 Mio. Euro formuliert. Dann würde die Gebietsgrenze der Gemeinde den potentiellen räumlichen Umsetzungsbereich darstellen. Die konkrete Umsetzung wird jedoch anhand der Parameter, die aus den betroffenen Gebäuden des 3D-Stadtmodells abgeleitet werden, auf ihre Machbarkeit geprüft und bei einem positiven Resultat auf ein konkretes Objekt angewandt. Ein wesentlicher Vorteil der Verwendung dieser Kombination aus den objektscharfen Entitäten der Stadt wie Gebäuden oder Straßen mit ökonomischen Abgrenzungen bzw. Einteilungen wie statistischen Blöcken oder Gemeindegrenzen liegt darin, dass diese Ebenen einheitlich und persistent sind. Sie entsprechen zudem den konkreten Entscheidungsgrenzen, für die eindeutige Zuständigkeiten bzw. Hoheiten bestehen. So können beispielsweise die Kosten für eine Fassadensanierung eines Gebäudes direkt auf dessen Besitzer bezogen werden.

### **Operationen**

Da Maßnahmen stets eine Veränderung des Stadtmodells bewirken, bestehen sie aus einer Menge von Operationen auf den Stadtmodellobjekten. Analog zur Einteilung der Maßnahmen in Kategorien lassen sich auch deren Operationen in drei Typen unterscheiden, die sich auf die Geometrie oder die Attribute der Objekte beziehen. Die Lösch-Operation entfernt Attributwerte oder ganze Stadtobjekte. Neue Attribute oder Objekte werden über eine Einfüge-Operation in das bestehende 3D-Stadtmodell eingefügt. Veränderungen an bestehenden Entitäten werden über eine Update-Operation definiert.

## Ressourcen

Ein wesentlicher Vorteil eines Formalismus zur semantischen Beschreibung von Maßnahmen besteht darin, dass durch ihn Auswirkungen von in der Realität geplanten Maßnahmen durch Simulationen auf dem virtuellen 3D-Stadtmodell vor der eigentlichen Umsetzung abgeschätzt und abgewogen werden können. So werden die Auswirkungen und die benötigten Ressourcenaufwände am Stadtmodell abgeschätzt bzw. virtuell verbraucht. Diese Ressourcen können benötigte Zeiten für die reale Umsetzungsdauer oder die Gültigkeit der Maßnahme sein. Zusätzlich können Ressourcen materieller Natur sein, wie Dämmmaterialien für eine Dachisolierung. Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit einer Maßnahme können Ressourcen Kosten darstellen, die sich aus Anschaffungskosten, Stückkosten und Betriebskosten zusammensetzen. Durch diesen Bestandteil der Maßnahme lassen sich die finanziellen Auswirkungen von geplanten Maßnahmen für verschiedene Szenarien abschätzen.

### 3 Datenmodell zur Modellierung von Maßnahmen

Die in Kapitel 2 über die Eigenschaften von Maßnahmen vorgestellten Konzepte werden als UML-Klassendiagramm umgesetzt. Die zentrale Klasse des Datenmodells ist die abstrakte Klasse *\_AbstractAction*. Im Attribut *function* dieser Klasse wird die Funktion bzw. Kategorie der Wirkungsweise der Maßnahme definiert. Bei komplexen Maßnahmen ist es notwendig, genauere Angaben über diese in Textform im Attribut *description* zu speichern. Eine Zuordnung der Maßnahme auf eine Aggregationsebene (Statistische Grenzen, Gebäude, Gebäudeteile) wäre neben dem räumlichen Bezug über die Assoziation der Maßnahme zur abstrakten CityGML-Klasse *\_CityObject* über ein eigenes Level-of-Detail-Konzept realisierbar. Analog zu dem Konzept, welches in CityGML umgesetzt wird, könnten Maßnahmen durch ein um statistische Grenzen erweitertes Konzept in Detailstufen eingeteilt werden. Der Vorteil wäre, dass bereits vor der Instanziierung der Maßnahme eine Aussage bezüglich der Entscheidungsgrenzen getroffen werden kann. In den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union werden räumliche Bezugseinheiten in ein einheitliches hierarchisches System gegliedert. Die sog. NUTS-Einheiten (*Nomenclature des unités territoriales statistiques*) werden im Wesentlichen in drei Ebenen geteilt (vgl. VERORDNUNG (EU) Nr. 31/2011). Die erste Ebene steht in Deutschland für die Bundesländer, die Zweite für Regionen (Regierungsbezirke) und die Dritte für die Kreise bzw. Gemeinden. Diese Einteilung erfolgt in gleicher Weise für die weiteren EU-Mitgliedsstaaten. Im Datenmodell ist für die Modellierung dieses Konzepts das Attribut *levelOfDetail* vorgesehen. Die abstrakte Klasse *\_AbstractAction* wird entweder zu einer Maßnahme (Klasse: *Action*) oder zu einer Teilmaßnahme (Klasse: *SubAction*) spezialisiert. Da eine *\_AbstractAction* aus mehreren Teilmaßnahmen bestehen kann, die wiederum eine Spezialisierung der Klasse *\_AbstractAction* sind, können über dieses Entwurfsmuster beliebig tiefe Aggregationshierarchien von zusammengesetzten Maßnahmen modelliert werden. Beide Klassen erben die Eigenschaften der abstrakten Klasse *\_AbstractAction*. Mittels der Selbstassoziation *before/after* an der Klasse *\_AbstractAction* können optional Reihenfolgebeziehungen zwischen den einzelnen Maßnahmen ausgedrückt werden.

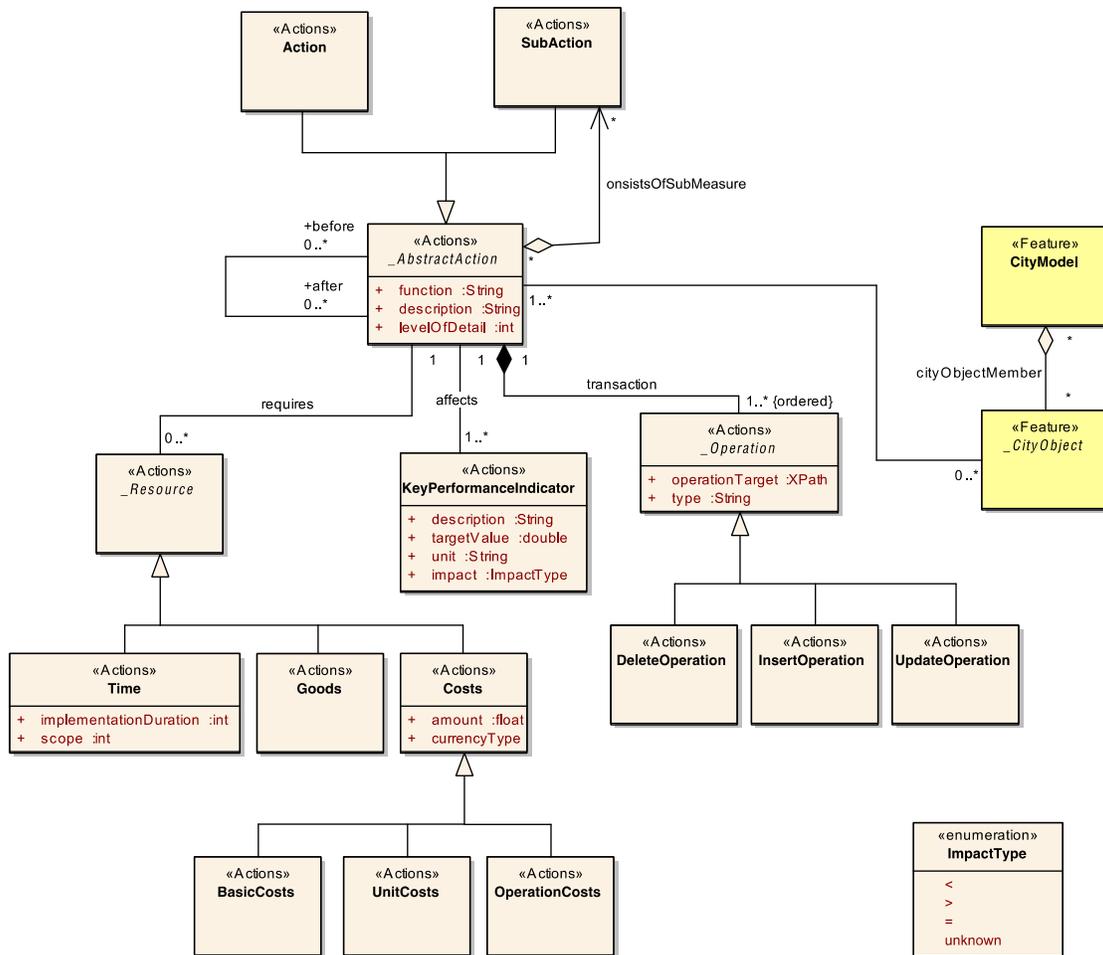


Abb. 3: UML-Klassendiagramm für das Datenmodell zur Repräsentation von Maßnahmen. Der Bezug zum Stadtmodell wird über die Assoziation von abstrakten Maßnahmen (*\_AbstractAction*) zu den Stadtmodellobjekten (*\_CityObject*) hergestellt.

Transaktionen auf den Bezugsobjekten werden durch die abstrakte Klasse *\_Operation* realisiert. Diese Klasse besitzt ein Attribut, welches einen Zeiger auf ein konkretes Element des assoziierten 3D-Stadtmodells speichert. Das kann ein ganzes Objekt sein oder nur ein Attribut eines Objekts. Eine Maßnahme besteht aus einer oder mehreren Operationen, die in einer geordneten Reihenfolge ausgeführt werden. Die abstrakte Klasse *\_Operation* wird zur Konkretisierung hinsichtlich ihrer Wirkungsweise (siehe Kapitel 2 – Kategorisierung von Maßnahmen) in die Klassen *DeleteOperation*, *InsertOperation* und *UpdateOperation* spezialisiert. Eine weitere Assoziation besteht zwischen einer Maßnahme und ihren benötigten Ressourcen (in der Realität), die im Datenmodell durch die abstrakte Klasse *\_Resource* repräsentiert werden. Eine Maßnahme erfordert eine oder mehrere Ressourcen (Klasse: *\_Resource*, die eine Generalisierung der Klassen *Time*, *Goods* und *Costs* ist). Die Kosten werden zu Basiskosten (Klasse: *BasicCosts*), Stückkosten (Klasse: *UnitCosts*) und Betriebskosten (Klasse: *OperationCosts*) spezialisiert. Eine weitere Assoziation besteht zu Leistungskennzahlen (Klasse: *KeyPerformanceIndicator*). Eine Maßnahme beeinflusst in der Regel eine oder mehrere dieser Kennzahlen. Neben dem Attribut *description* für die Beschreibung der Leistungskennzahl und Attributen für den Zielwert (Attribut:

*targetValue*) und dessen Einheit (Attribut: *unit*) wird die Information über die Art der Wirkung der Maßnahme durch das Attribut *impact* dargestellt. Das Attribut kann Werte vom Datentyp *ImpactType* annehmen (ein Aufzählungstyp). Das *,>-Zeichen* steht für eine positive Veränderung des KPI durch die Maßnahme, das *,<-Zeichen* für eine negative Veränderung. Wenn die Maßnahme keinen Einfluss auf den KPI hat, nimmt das Attribut das *Gleichheitszeichen* als Wert an. Sollte die Wirkung auf den KPI unbekannt sein, wird dies durch den Wert *unknown* ausgedrückt.

## 4 Anwendungsbeispiel

Bei der Planung von Maßnahmen in urbanen Räumen ist spezifisches und komplexes Fachwissen aus unterschiedlichen Fachdisziplinen notwendig. Dieses Fachwissen wird von Experten der verschiedenen Fachrichtungen bereitgestellt. Jeder Experte modelliert prototypische Maßnahmen für seine Domäne. Sie können als Anleitungen für die Durchführung von Maßnahmen gesehen werden, die somit einen prototypischen Charakter besitzen.

Durch die Modellierung einer Maßnahme wird zum einen deren Komplexität in einer "Black Box" vor dem Planer verborgen. Zum anderen wird durch die streng formale Repräsentation eine Möglichkeit geschaffen, die Maßnahme auf dem virtuellen 3D-Stadtmodell durchzuführen. Die für die Ausführung der Maßnahme in der Realität verantwortlichen Planer können somit auf einen Pool an potentiellen Maßnahmen zurückgreifen, ohne deren Funktionsweise kennen zu müssen. Sie grenzen ein räumliches Gebiet ein und treffen eine thematische Vorauswahl. Nun werden die Werte, die bei der vollständigen Instanziierung von Maßnahmen aus den zugeordneten Entitäten des Stadtmodells in dem ausgewählten Gebiet entnommen werden, mit den Bedingungen verglichen, die durch die modellierte Maßnahme vorgegeben sind. Damit kann dem Planer eine nach Anwendungsfall optimierte Auswahl anwendbarer Maßnahmen angeboten werden.

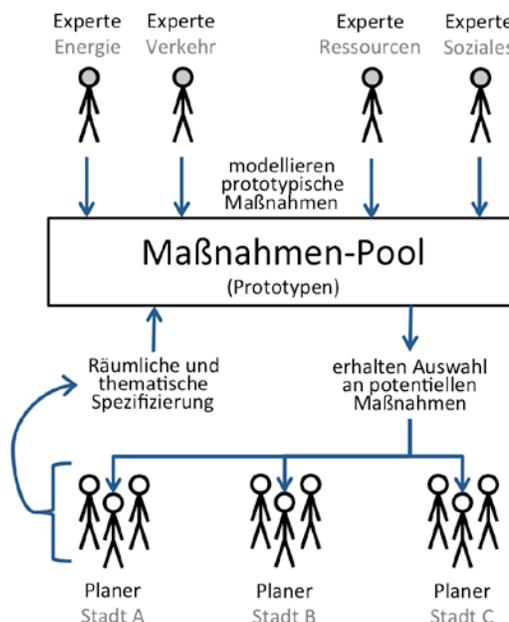


Abb. 4: Ablaufplan von der Modellierung von Maßnahmen bis zur automatisierten Auswahl von potentiellen Maßnahmen.

Abbildung 4 verdeutlicht, dass durch die formale Repräsentation einer Maßnahme ein Planungswerkzeug zur Verfügung steht, welches eine anwendungsbezogene Szenario-Analyse ermöglicht. Ein Geoinformationssystem könnte einem Planer nun die für ein selektiertes Stadtmodellobjekt konkret durchführbaren Maßnahmen herausfiltern und zur Auswahl anbieten. Dabei könnte der Planer sofort berechnen, welche Effekte diese Maßnahmen auf die Stadt und die KPIs hätten.

## 5 Betrachtung verwandter Arbeiten Dritter

An der Entwicklung von Entscheidungsunterstützungssystemen für die Planung städtischen Raumes sind unterschiedliche Disziplinen beteiligt. Es können zwei Ansätze differenziert werden, die sich hinsichtlich ihrer Modellierungsparadigmen und den verwendeten Simulationsmethoden unterscheiden.

Ansätze aus der Bauinformatik und Bauphysik (vgl. BAZJANAC et al. 2011, ERHORN-KLUTTIG et al. 2013, NG & AI 2013) besitzen einen sehr hohen Detaillierungsgrad, der sich sowohl auf die Modellierungstiefe der Gebäude als auch auf die möglichen Maßnahmen bezieht. Die Ergebnisse, die bei Szenario-Analysen erzielt werden, sind spezifisch für das Szenario und dadurch verhältnismäßig präzise. Durch die Komplexität ist jedoch ein tiefes Verständnis für die Bedienung dieser Werkzeuge notwendig. Die Systeme sind für Fragestellungen, die sich auf einzelne Gebäude beziehen optimiert und behandeln diese als geschlossene Systeme. Über grafische Benutzerschnittstellen können vordefinierte Maßnahmen angewandt werden. Es besteht jedoch keine Möglichkeit neue Maßnahmen zu definieren und diese formal zu modellieren.

Der zweite Ansatz (vgl. HOFMAN et al. 2011, JEBBERGER et al. 2011, KEIRSTEAD & SIVAKUMAR 2012, KOPPELAAR et al. 2013) simuliert Prozesse auf diffuseren Bezugsebenen wie statistischen Gebietsgrenzen oder auf der Basis von einem regelmäßig angeordneten Gitter, in welches das Untersuchungsgebiet eingeteilt wird. Auch in diesen Arbeiten wird kein Formalismus vorgestellt, der es ermöglicht, Maßnahmen zu modellieren. Der Fokus dieser Arbeiten liegt in der Bereitstellung von Werkzeugen und Systemen, die auf spezifische Anwendungsfälle zugeschnitten sind.

Mit Hilfe der Konzepte und des Datenmodells zur semantischen Modellierung von Maßnahmen, die in den vorangestellten Kapiteln beschrieben wurden, ist es nun möglich, Maßnahmen, die sich auf Gebäude oder deren Bestandteile beziehen, mit Maßnahmen, die sich auf statistische Gebietsgrenzen beziehen, in einem System integriert zu betrachten. Es wird somit eine größtmögliche Menge an unterschiedlichen Aggregationsebenen von der Stadtgrenze bis hin zum Einzelgebäude zusammengefasst.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Für eine kollaborative Planung von Stadtsystemen ist ein einheitliches Verständnis über die Zerlegung der Stadt in ihre Bestandteile notwendig, um die Transformationsprozesse auf und zwischen den Stadtobjekten simulieren und somit Aussagen über Auswirkungen möglicher Szenarien treffen zu können. Diese gemeinsame Basis ist durch den internationalen Standard CityGML gegeben. Semantische 3D-Stadtmodelle, die nach dieser Ontologie repräsentiert werden, zeigen jedoch nur ein statisches Abbild der Stadtobjekte zu festen Zeitpunkten. In diesem Beitrag wurde ein Konzept vorgestellt, welches es erlaubt, Maßnahmen als semantische Transaktionen auf den

Entitäten virtueller 3D-Stadtmodelle als Objekte zu modellieren. Durch dieses Konzept ist es nun möglich, dass Planer Maßnahmen, die in der Realität ausgeführt werden sollen, vor ihrer Umsetzung auf dem virtuellen Stadtmodell ausführen und die realen Auswirkung abschätzen können. Maßnahmen werden zuerst prototypisch modelliert. Das bedeutet, dass zwar die Wirkungsweisen modelliert werden, die Maßnahme selbst jedoch noch nicht auf ein konkretes Gebäude oder anderes Stadtobjekt angewandt wird. In diesem Fall sprechen wir von prototypischen Maßnahmen. Diese Maßnahmen stehen dem Planer in einem Pool potentieller Maßnahmen zur Verfügung. Durch die Anwendung einer Maßnahme auf ein konkretes Objekt wird diese instanziiert – die prototypische Maßnahme wird zur spezifischen Maßnahme. Ein wesentlicher Vorteil, dass Maßnahmen als Objekte modelliert werden und sich diese Maßnahmen auf die Entitäten in CityGML beziehen, ist die direkte Übertragbarkeit prototypisch formulierter Maßnahmen auf Stadtmodelle unterschiedlicher Städte.

Das in diesem Beitrag vorgestellte Datenmodell stellt einen ersten Vorschlag zur Modellierung von Maßnahmen dar. Aktuell untersuchen wir am Beispiel der deutschen Energieeinsparverordnung (EnEV), inwieweit sich darin beschriebene Maßnahmen mittels des hier vorgestellten formalen Modells repräsentieren und auf CityGML-Modelle beziehen lassen.

Künftig bedarf es noch einer tieferen Betrachtung von Vorbedingungen. Um beispielsweise ein Gebäude mit einer Fernwärmeheizung auszustatten, muss vorab eine Anbindung an das Fernwärmenetz eines Energieversorgers sichergestellt sein. Sowohl die Anbindung des Gebäudes an das Versorgungsnetz als auch die Installation der neuen Heizanlage im Gebäude sind einzelne Maßnahmen. Die erfolgreiche Umsetzung der Installationsmaßnahme setzt eine Anbindungsmaßnahme an das Netz voraus. Die Möglichkeit, diese Bedingungen zu modellieren, ist im Datenmodell noch nicht umgesetzt. In einem weiteren Schritt wird die Prüfung von bestehenden Ansätzen zur Modellierung von Maßnahmen, wie sie beispielsweise in der Agenten-basierten Modellierung umgesetzt werden, auf das in diesem Beitrag vorgestellte Konzept sein.

## 7 Literaturverzeichnis

- BAZIANAC, V., MAILE, T., ROSE, C., O'DONNELL, J. T., MRAZOVIC, N., MORRISSEY, E. & WELLE, B. R., 2011: An Assessment of the use of Building Energy Performance Simulation in early Design. In: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, S. 1579-1585.
- ERHORN-KLUTTIG, H., ERHORN, H., WEBER, J., WÖSSNER, S. & BUDDE, E., 2013: The District Energy Concept Adviser: A software tool from IEA ECBCS Annex 51 to support Urban Decision Makers in planning District Energy Supply Schemes. In: Hauser, G., Lützkendorf, T. & Eßig, N. (Hrsg.), Sustainable Building Conference sb13 munich, 24.-26. April 2013, Implementing Sustainability - Barriers and Chances, S. 213-222.
- GRÖGER, G., KOLBE, T. H., NAGEL, C. & HÄFELE, K.-H., 2012: OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard, v2.0, OGC Doc. No. 12-019. URL: <http://www.opengeospatial.org/standards/citygml> (4. 1. 2014).
- HOFMAN, W., LOHMAN, W., & SCHELLING, A., 2011: A Flexible IT Infrastructure for Integrated Urban Planning. In: Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research. Vol. 6 / Issue 1, S. 16-25.

- JEBBERGER, CH., SINDRAM, M. & ZIMMER, M., 2011: Global Warming Induced Water-Cycle Changes and Industrial Production – A Scenario Analysis for the Upper Danube River Basin. In: *Jahrbücher für Nationalökonomie und Statistik* 231 (3), S. 415-439.
- KADEN, R. & KOLBE, T. H., 2013: City-wide Total Energy Demand Estimation of Buildings using Semantic 3D City Models and Statistical Data. In: *Proc. of the 8<sup>th</sup> Int. Conference on 3D Geo-Information 2013 in Istanbul*. ISPRS Annals, Vol. II-2/W1, S. 163-171.
- KADEN, R., PRYTULA, M., KRÜGER, A. & KOLBE, T. H., 2013: Energieatlas Berlin: Vom Gebäude zur Stadt – am Beispiel zur Abschätzung der Wärmeenergiebedarfe von Gebäuden. In: KOCH, A., BILL, R. & DONAUBAUER, A. (Hrsg.), *Geoinformationssysteme 2013, Beiträge zum 18. Münchner Fortbildungsseminar*, Wichmann Verlag, S. 17-32.
- KEIRSTEAD, J. & SIVAKUMAR, A. 2012: Using Activity-Based Modeling to Simulate Urban Resource Demands at High Spatial and Temporal Resolutions. In: *Journal of Industrial Ecology*. Vol. 16 / Issue 6, S. 889-900.
- KOLBE, T. H., 2009: Representing and Exchanging 3D City Models with CityGML. In: LEE, J. & ZLATANOVA, S. (Eds.): *3D Geo-Information Sciences*, Springer, S. 15-31.
- KOPPELAAR, R., KUNZ, H. & RAVALDE, T., 2013: Review of Current Advanced Integrated Models for City Regions. The ecological sequestration trust.
- KRÜGER, A. & KOLBE, T. H., 2012: Building Analysis for Urban Energy Planning Using Key Indicators on Virtual 3D City Models - The Energy Atlas of Berlin. In: *Proceedings of the ISPRS Congress 2012 in Melbourne, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B2*, 2012.
- NG, T.S.T, AI, E.X.F., 2013: A Framework to Establish Suitable Sustainable Refurbishment Strategies for Residential Buildings. In: *Proceedings of International Conference on Implementing Sustainability – Barriers and Chances (SB13 Munich)*, April 24-26, Bayerische Akademie der Wissenschaften, München.
- VERORDNUNG (EU) Nr. 31/2011 der Kommission vom 17. Januar 2011 zur Änderung der Anhänge der Verordnung (EG) Nr. 1059/2003 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Schaffung einer gemeinsamen Klassifikation der Gebietseinheiten für die Statistik (NUTS).