

Der Gebäudekragen – Eine detaillierte Betrachtung des Übergangs von Gebäude und Gelände

JÖRG SCHMITTWILKEN¹ & THOMAS H. KOLBE² & LUTZ PLÜMER³

Zusammenfassung: Die zunehmende Zahl von Anwendungen virtueller 3D-Stadtmodelle geht mit steigenden Anforderungen an die Qualität und Auflösung der Modelle einher. Die Erhöhung der geometrischen Auflösung ist durch die Fortschritte in der Sensortechnologie im Bereich des Laserscannings und der photogrammetrischen Bilderfassung bereits Realität. Es mangelt jedoch an ausreichend detaillierten semantischen Modellen, die dem geometrischen Detaillierungsgrad entsprechen. Denn erst die Semantik erschließt jene Anwendungsbereiche, die über eine bloße Visualisierung oder Sichtbarkeitsanalyse hinausgehen.

Dieser Beitrag stellt eine detaillierte semantische Modellierung des Übergangsbereiches vom Gelände zum Gebäude – den Gebäudekragen – vor. Er berichtet über aktuelle Forschungsarbeiten in einem DFG-geförderten, chinesisch-deutschen Kooperationsprojekt. Neben der Diskussion des entwickelten Modells des Gebäudekragens wird auch eine kurze Vorausschau zur Nutzung der Gebäudekragen-Ontologie für die Entwicklung automatisierter Extraktionsverfahren gegeben.

1 Einleitung

Virtuelle 3D-Stadtmodelle werden in vielen Bereichen zur Analyse, Bewertung und Darstellung urbaner Situationen eingesetzt und sind beispielsweise für die Hochwassersimulation oder die aktuell diskutierte Umsetzung der EU-Umgebungslärmrichtlinie 2002/49/EG von hoher Bedeutung. Die zunehmende Zahl von Anwendungen geht mit steigenden Anforderungen an Qualität und Auflösung der Modelle einher. So werden die Ansprüche der Anwender z.B. bei der Fußgängernavigation nicht durch ein einfaches Klötzchenmodell befriedigt. Hier sind 3D-Stadtmodelle mit höherem Detaillierungsgrad (level of detail, LOD) gefragt, die differenzierte Dachstrukturen, wichtige Gebäudebestandteile wie Balkone, Erker oder Eingangsbereiche und präzise Geländemodelle erfordern.

Aufgrund der aktuell verfügbaren Sensortechnologie im Bereich des Laserscannings und der photogrammetrischen Bilderfassung ist die Erhöhung der geometrischen Auflösung bereits Realität. Jedoch mangelt es an ausreichend detaillierten semantischen Modellen, die dem geometrischen Detaillierungsgrad entsprechen. Gehen die Bedürfnisse der Anwender über eine bloße Visualisierung hinaus, so wird ein 3D-Modell benötigt, das die Bedeutung der Objekte, ihre Beziehungen zueinander und thematische Attribute beinhaltet. Letztendlich erschließt erst die explizite thematische Modellierung viele Anwendungsbereiche wie die Indoor-Navigation oder das Facility-Management. Es werden daher Konzepte und Modelle benötigt, die eine geometrische und semantische Verfeinerung existierender 3D-Stadtmodelle ermöglichen.

Der hier angesprochene Skalenwechsel von einfachen 3D-Modellen zu komplexen Architekturmodellen (vgl. Abbildung 1) wird derzeit in einem Projekt am Institut für Kartographie und Geoinformation (IKG) der Uni Bonn untersucht. Er entspricht dem Übergang von LOD2

¹ Dipl.-Ing. Jörg Schmittwilken, E-Mail: schmittwilken@ikg.uni-bonn.de

² Dr. Thomas H. Kolbe, E-Mail: kolbe@ikg.uni-bonn.de

³ Prof. Dr. Lutz Plümer, E-Mail: pluemer@ikg.uni-bonn.de

nach LOD3 gemäß der von der Special Interest Group 3D (SIG 3D) der Initiative Geodateninfrastruktur NRW (GDI NRW) vorgeschlagenen fünf Detaillierungsgrade für 3D-Stadtmodelle (KOLBE & GRÖGER 2006; GRÖGER ET AL. 2005, KOLBE ET AL. 2005). Das Projekt ist eingebettet in das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und dem chinesischen Pendant geförderten Bündelprojekt „Interoperation of 3D Urban Geoinformation“. Darin beschäftigen sich seit Anfang 2006 elf chinesische Partner und acht Institute deutscher Hochschulen mit der Interoperabilität und semantischen Anreicherung urbaner 3D-Geoinformation. Der Übergang von Gebäude und Gelände ist der zentrale Untersuchungsgegenstand des Teilprojekts, bei dem das IKG und das Institut für Photogrammetrie der Universität Bonn kooperieren. Basierend auf einer Ontologie dieses Übergangs sollen die darin befindlichen Objekte wie Eingangstreppe oder Arkaden semiautomatisch aus terrestrischen Stereobildern rekonstruiert werden. Im Folgenden wird der Fokus auf den Modellierungsaspekten liegen.

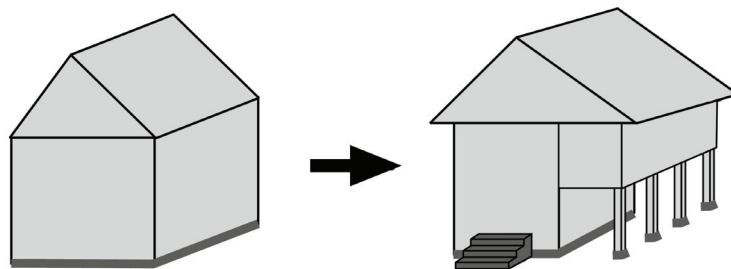


Abbildung 1: Erhöhung der geometrischen und semantischen Auflösung beim Skalenwechsel zwischen LOD2 (links) und LOD3 (rechts). Alle geometrischen Primitive sind thematisch klassifiziert.

Die Fragestellung nach Art und Beschaffenheit des Übergangs von Gebäude und Gelände soll durch zwei Überlegungen motiviert werden:

1. Geodateninfrastrukturen (GDIs) ermöglichen es dem Anwender, Daten im Baukastensystem von mehreren Anbietern zusammenzustellen. Da die Daten nicht nur aus heterogenen Quellen stammen, sondern häufig auch auf unterschiedlichen Erfassungsmethoden basieren, passen die Daten oft geometrisch und semantisch nicht zueinander. Als typisches Beispiel seien Gebäude genannt, die mit dem digitalen Geländemodell (DGM) aus einer anderen Datenquelle gemeinsam visualisiert werden. Die Gebäude werden in vielen Fällen über der Geländeoberfläche schweben oder (zu tief) in diese einsinken.
2. Bei stetiger Verfeinerung der Auflösung von 3D-Stadtmodellen wird letztendlich auch die Innenraummodellierung von Interesse sein. Der Übergang von Außenbereichen zu Innenräumen erschließt völlig neue Anwendungsgebiete für 3D-Stadtmodelle. Dies setzt aber die geometrisch, topologisch und semantisch korrekte Repräsentation der realen Welt voraus. Soll ein so detailliertes Modell beispielsweise zur Navigation genutzt werden, können Innenräume nur dann von einer Straße aus erreicht werden, wenn die Topologie zwischen Innenräumen und Außenbereichen korrekt wiedergegeben wird und die beiden Bereiche nahtlos ineinander übergehen. Überlappungen oder Löcher machen eine automatische Navigation unmöglich.

2 Der Gebäudekragen

Eine skalenabhängige Betrachtung des Übergangs von Gebäude und Gelände erfordert eine detaillierte räumliche und semantische Modellierung. Im LOD2-Modell (Abbildung 1 links) wird dieser Übergang durch eine einfache *Bodenkante* (Schnittlinie zwischen Gelände und Gebäude – dunkel grau) beschrieben. Bei der Erhöhung der geometrischen Auflösung treten feine Fassadenstrukturen wie Fensterbänke und Simse ebenso in Erscheinung, wie Treppen,

Erker, Balkone oder Eingangsbereiche. Im höheren Detaillierungsgrad weicht das Konzept der Bodenkante auf und ein scharfer, linienförmiger Übergang ist aufgrund von Objekten wie Treppen, Arkaden oder Lichtschächten nicht mehr auszumachen (Abbildung 1 rechts). Vielmehr tritt hier der *Gebäudekragen* (Abbildung 2) als ein unscharfer Bereich des Übergangs von Gebäude und Gelände, von Innenräumen und Außenbereich an die Stelle der Bodenkante. Die Bezeichnung wurde als Metapher zum Hemdkragen gewählt, der den Übergang von der (horizontalen) Schulterpartie zum (vertikal herausragenden) Kopf gestaltet. Im Sinne einer Faustformel könnte man ihn wie folgt skizzieren: „Die Außenwände von Keller, Erdgeschoss und erstem Obergeschoss und alle Objekte im Umkreis von 15m um das Gebäude“.

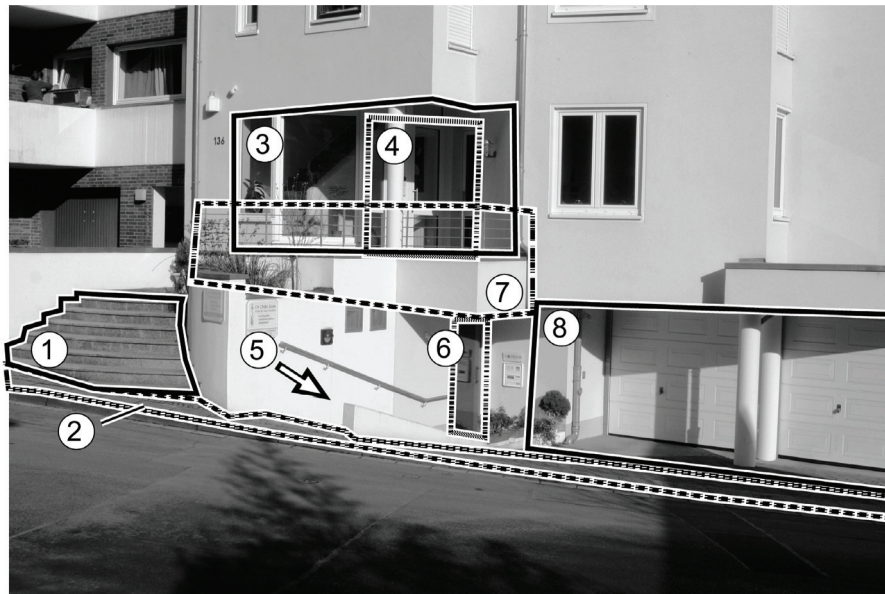


Abbildung 2: Elemente des Gebäudekragens: 1) Treppe, 2) Gehweg, 3) aufgeständertes Gebäudeteil („Arkade“), 4) Eingangsbereich, 5) Treppe, 6) Eingangsbereich, 7) Balkon/Terrasse, 8) aufgeständertes Gebäudeteil („Arkade“).

2.1 Das semantische Modell des Gebäudekragens

Für die angestrebte semi-automatische Extraktion der Objekte aus Bildern müssen die zu rekonstruierenden Elemente explizit im Sinne einer Ontologie des Gebäudekragens modelliert werden. CityGML stellt dafür eine geeignete Basis dar. Die in CityGML definierte Semantik der Objekte *BuildingPart* (z.B. Wintergarten), *BuildingInstallation* (z.B. Treppe) oder *GenericCityObject* genügen den Ansprüchen des Datenaustauschs; die Objekte des Gebäudekragens müssen für die Entwicklung automatisierter Extraktionsverfahren aber spezifischer modelliert und repräsentiert werden. Im Folgenden wird ein Modell des Gebäudekragens vorgestellt, das den räumlichen und semantischen Anforderungen bis hin zu LOD3 genügt.

Abb. 3 zeigt ein vereinfachtes statisches UML-Klassendiagramm (*Unified Modeling Language*, BOOCH ET AL., 1997) des Gebäudekragens (*BuildingCollar*), das lediglich die Hauptklassen der enthaltenen Objekte darstellt⁴. Als Oberklassen und somit Hauptbestandteile des Gebäudekragens wurden die Objekte Verkehrsfläche, Arkade, Wand, Eingang, Lichtschacht, Straßenmöbel, Terrasse, Böschung, Begrenzung, Gewässer und Vegetationsobjekt identifiziert. Nicht dargestellt sind in dem Diagramm die Beziehungen zwischen den Objekten wie

⁴ Zur UML-Notation: Die Linienverbindung mit der Raute repräsentiert eine Aggregationsbeziehung zwischen zwei Objekten, Zahlen und/oder * geben die Multiplizitäten an. Das Diagramm ist folgendermaßen zu lesen: „Ein Gebäudekragen besteht aus keiner oder beliebig vielen Arkaden – Eine Arkade gehört zu genau einem Gebäudekragen.“

beispielsweise die Aggregationsbeziehung zwischen Arkaden und Wänden (Eine Arkade besteht u.a. aus Wänden). Jede dieser Oberklassen hat Aggregations-, Spezialisierungs- und/oder Assoziationsbeziehungen zu weiteren Klassen, so dass das Modell insgesamt 47 Objektklassen umfasst. Darüber hinaus sind 15 teils abstrakte Klassen aus CityGML übernommen (z.B. *CityFurniture*).

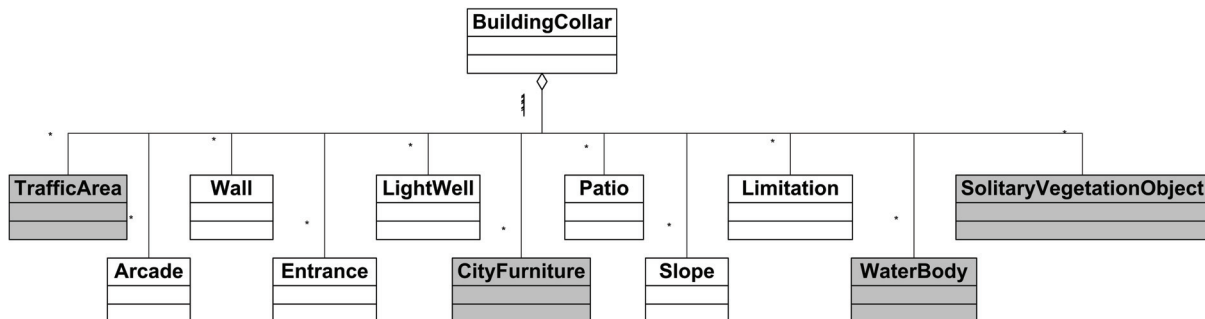


Abbildung 3: Hauptobjekte des Gebäudekragens in einem UML-Klassendiagramm. CityGML-Basisklassen sind grau hinterlegt. Die anderen Klassen stellen Erweiterungen dar.

Die Darstellung des gesamten Diagramms würde den Umfang dieses Artikels überschreiten, so dass im Folgenden das Detailmodell für Eingangstreppten beispielhaft vorgestellt wird, das wie in Abbildung 4 dargestellt in das Gesamtmodell integriert ist.

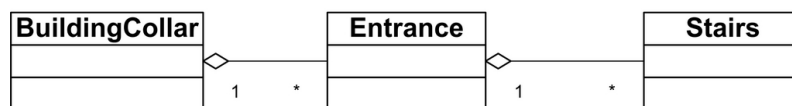


Abbildung 4: UML-Klassendiagramm zur semantischen Einordnung von Eingangstreppten in den Kontext des Gebäudekragens.

2.1.1 Detailbetrachtung von Eingangstreppten

Im Rahmen des oben erwähnten Projekts werden Eingangstreppten als besondere Beispielobjekte betrachtet. Dies liegt zum einen an ihrer einfachen und regelmäßigen Struktur und der daraus resultierenden überschaubaren Zahl der Parameter. Symmetrie, Parallelitäten und Kollinearitäten sind wichtige Eigenschaften von Treppen und ihren Elementen. Zum anderen ist gerade ihre verbindende Funktion zwischen Innenräumen und Außenbereich sowie die Verbindung mit dem Wegenetz von besonderem Interesse.

Die Bedeutung einer Treppe liegt unter anderem in der fußläufigen Überwindung eines Höhenunterschieds. Das alleine unterscheidet sie aber noch nicht von einer Leiter. Entscheidend für eine Treppe ist die Begehbarkeit und die iterative Anordnung aus versetzten Stufen. Die geometrischen Eigenschaften von Treppen wurden erstmals von BLONDEL (1683) nach Kriterien der Bequemlichkeit beschrieben. Auch die Deutsche Industrie Norm DIN 18065 (Gebäudetreppten) macht wichtige Aussagen zur Geometrie, Mindest- und Höchstmaßen von Treppen. Gemäß dieser Norm setzt sich eine Treppe aus Stufen zusammen, die wiederum aus *Steigungen* (vertikale Elemente) und *Auftritten* (horizontale Elemente) bestehen.

In Abbildung 5 ist das UML-Klassendiagramm einer Treppe dargestellt. Das gezeigte Modell erlaubt es sowohl mehrere Treppen (*Stairs*) zu einer Gesamttreppe (*AggregatedStairs*) zusammenzufassen, als auch das Hinzufügen von Podesten (*Platform*) zwischen unterschiedlichen Treppen. Es können beliebig viele Treppen in ein Podest münden. Dabei werden die höher liegenden und die tiefer liegenden Treppen durch die Assoziationen *lowerStairs* und *upperStairs* dem Podest zugeordnet. Die Klassen für vertikale und horizontale Elemente (*Riser*, *Tread*) referenzieren durch die Attribute *upperXPart/lowerXPart* ($X = \text{Riser}$ oder Tread)

die beidseitig anschließenden Elemente. Durch entsprechende Assoziationen werden GML-Geometrieobjekte vom abstrakten Typ *_Curve* (Polygon, Spline o.ä.) referenziert, welche die Treppenkanten (*upperCurve/lowerCurve* bzw. *leadingCurve/trailingCurve*) explizit beschreiben. Das GML-Geometrie- und Topologiemodell basiert dabei auf der ISO-Norm 19107 „Spatial Schema“ (siehe COX ET AL. 2004, HERRING 2001). Gerade für die bildbasierte Objekterkennung sind diese Kanten aufgrund ihrer guten Detektierbarkeit in Bildern von großer Bedeutung. Die Kanten der Treppenelemente sind vom Typ *_Curve*, um das Modell nicht auf Treppen mit geraden Stufen zu beschränken. Auf diese Weise lassen sich z.B. auch Kegeltreppen abbilden. Darüber hinaus werden allen Elementen über die Assoziation *lod3Surface* flächenhafte GML-Geometrien (*_Surface*) zugeordnet. Zusätzlich referenziert die Klasse *Stairs* auch die volumenhafte GML-Geometrie *Solid*.

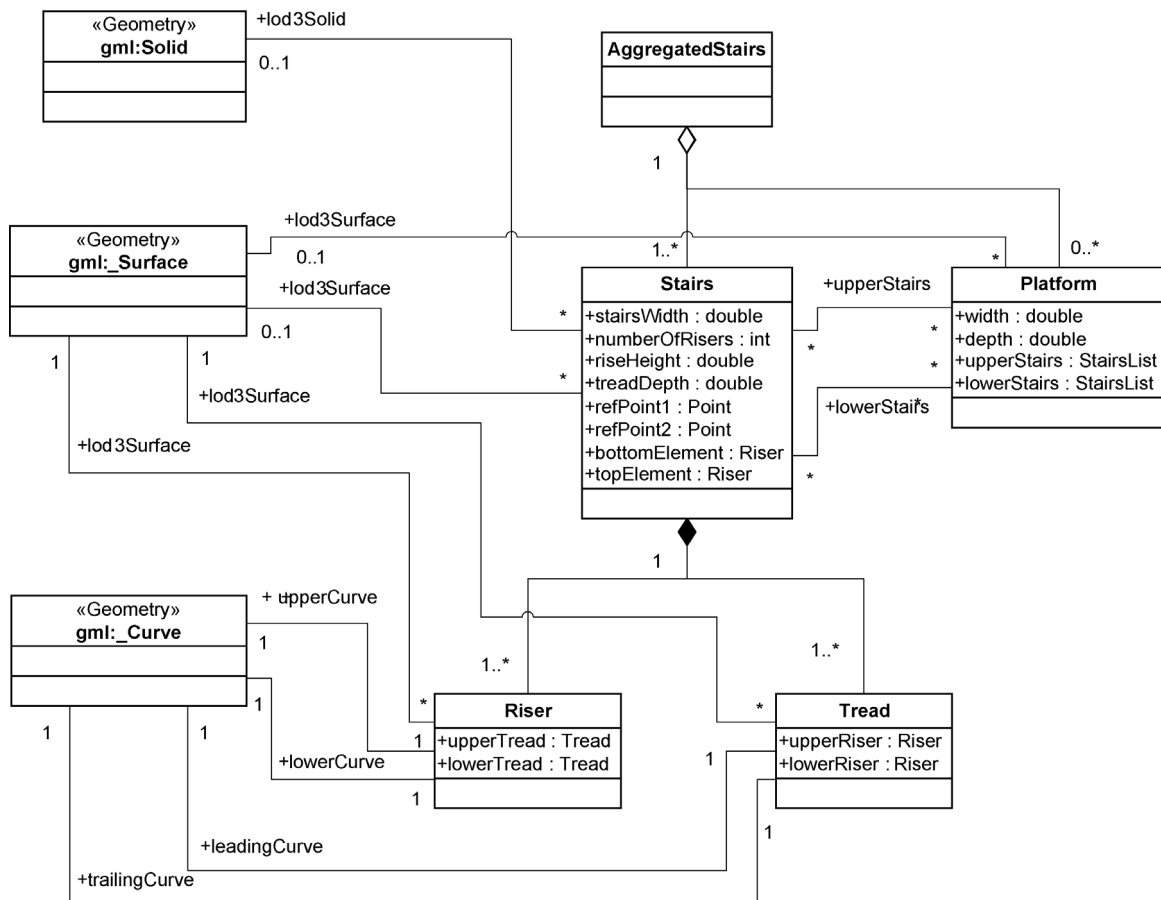


Abbildung 5: Statisches UML-Klassendiagramm der Detailmodellierung von Eingangstrepfen

Die Form, Lage und Orientierung der Treppe wird bestimmt durch die Parameter *stairsWidth* (Breite der Treppe), *numberOfRisers* (Anzahl der Steigungen), *riseHeight* (Höhe der Steigungen), *treadDepth* (Tiefe der Auftritte), *refPoint1* (erster 2D-Referenzpunkt), *refPoint2* (zweiter 2D-Referenzpunkt). Zusätzlich werden Verweise auf die abschließenden Elemente einer Treppe als Attribut geführt: *bottomElement* und *topElement* müssen beide vom Typ eines vertikalen Elements (*_verticalPart*) sein.

Die Informationen der Treppenparameter sind redundant zu der explizit gegebenen Randflächendarstellung (*Boundary Representation*, B-Rep) und bedingen sich gegenseitig. So lässt sich beispielsweise aus den beiden 2D-Referenzpunkten die Breite und unter Berücksichtigung der Auftrittstiefe die Anzahl der Steigungen ableiten. Diese scheinbare Unzulänglichkeit des Modells wird im nächsten Kapitel aufgegriffen und ausgeführt.

Das vorgestellte Modell einer Gebäudetreppe macht über die Form von Treppen bislang nur wenige Aussagen. In dem Diagramm fehlen beispielsweise Informationen, die den sich immer wiederholenden Wechsel von Steigung und Auftritt erzwingen. Das statische UML-Modell sieht auch eine Treppe, die lediglich aus Auftritten besteht, als Treppe an. Zwar haben die Klassen *Rise* und *Tread* Assoziationen, die auf die benachbarten Objekte des jeweils anderen Typs verweisen sollen, dies stellt aber noch nicht sicher, dass die beiden Objekte eine gemeinsame Kante haben und somit wirklich benachbart sind. Es ist notwendig, Bedingungen zu formulieren, welche das Modell soweit einschränken, dass nur „echte“ Treppen abgebildet werden können, die diese Nachbarschaften berücksichtigen.

Für Steigungen können diese Bedingungen wie folgt skizziert werden (für die Auftritte entsprechend):

- Die durch *upperCurve* referenzierte Kante muss identisch sein, mit der durch *leadingCurve* referenzierten Kante des *upperTread*.
- Die durch *lowerCurve* referenzierte Kante muss identisch sein mit der durch *trailingCurve* referenzierten Kante des *lowerTread*.
- Die *upperCurve* und die *lowerCurve*
 - müssen jeweils in einer horizontalen Ebene liegen,
 - müssen den gleichen Grundriss in der 2D-Projektion (XY-Ebene) haben und
 - müssen den gleichen Abstand zueinander haben, den der Parameter *riseHeight* der Treppe vorgibt, zu dem diese Elemente gehören.
- Die *upperCurve* muss höher liegen als die *lowerCurve*.

Ein möglicher Formalismus zur konsistenten Beschreibung dieser Bedingungen ist die *Object Constraint Language* (OCL, OMG 2003). OCL ist eine formale Sprache, die konzipiert wurde, um Bedingungen (Invarianten) auf der Ebene von Objektinstanzen in deklarativer Weise ausdrücken zu können. In der OCL-Notation würde die erste der zuvor skizzierten Bedingungen so lauten:

```
context r: Riser inv:  
r.upperCurve = r.upperTread.leadingCurve
```

3 Generative Modelle

Die Differenzierung des Gebäudekragens hat das Ziel der halbautomatischen Rekonstruktion der darin enthaltenen Elemente aus terrestrischen Stereobildern, welche vorhandene LOD2-Modelle geometrisch und semantisch durch die neu extrahierten 3D-Objekte veredeln sollen. Die folgenden Überlegungen werden erneut beispielhaft anhand der Treppen diskutiert.

Das UML-Modell für Treppen ist Ausgangspunkt für die Ableitung eines 3D-Geodatenbankschemas, in der künftig die rekonstruierten Elemente (zwischen)gespeichert werden. In Verbindung mit den in OCL formulierten Bedingungen ermöglicht es zudem die Validierung instanzierter Objekte und die Definition entsprechender Integritätsregeln auf der 3D-GeODB. Bei der Rekonstruktion stellt sich allerdings die Frage nach der Generierung solcher Objektinstanzen. Da mit unvollständigen und fehlerbehafteten Beobachtungen in den Bildern gerechnet werden muss, müssen Hypothesen für Treppen erzeugt werden, die von ihrer Form her Treppen darstellen und welche die (nur teilweise) beobachteten Merkmale erklären können. Um die erlaubten Objektkombinationen sowie die iterativen Modellelemente wie z.B. Treppenstufen systematisch anzuordnen, wird eine zusätzliche generative Modellierungskomponente benötigt. Dazu soll in dem Projekt künftig die Verwendung von Gestaltgrammatiken (STINY & GIBS 1972) zur Beschreibung generativer Modelle untersucht werden.

STEINHAGE (1999) hat Gestaltgrammatiken bereits zur automatischen Gebäuderekonstruktion aus Luftbildern eingesetzt. Sie basieren auf einer Menge geometrischer Elemente (Symbole, Alphabet) und Ersetzungsregeln. Ausgehend von einem festgelegten Startsymbol werden durch sukzessives Anwenden der Ersetzungsregeln auf Teile bestehender Kombinationen geometrischer Grundelemente letztendlich Objekte (Worte) generiert. Für Treppen könnte eine solche Grammatik wie in Abbildung 6 dargestellt aussehen. Gezeigt sind die Ersetzungsregeln: Gestrichelte Elemente (Nichtterminalsymbole) können durch nicht gestrichelte Elemente (Terminalsymbole) ersetzt werden. Das Alphabet der Treppengrammatik besteht aus Steigungen (senkrecht), Aufritten (waagrecht, kurz) und Podesten (waagrecht, lang).

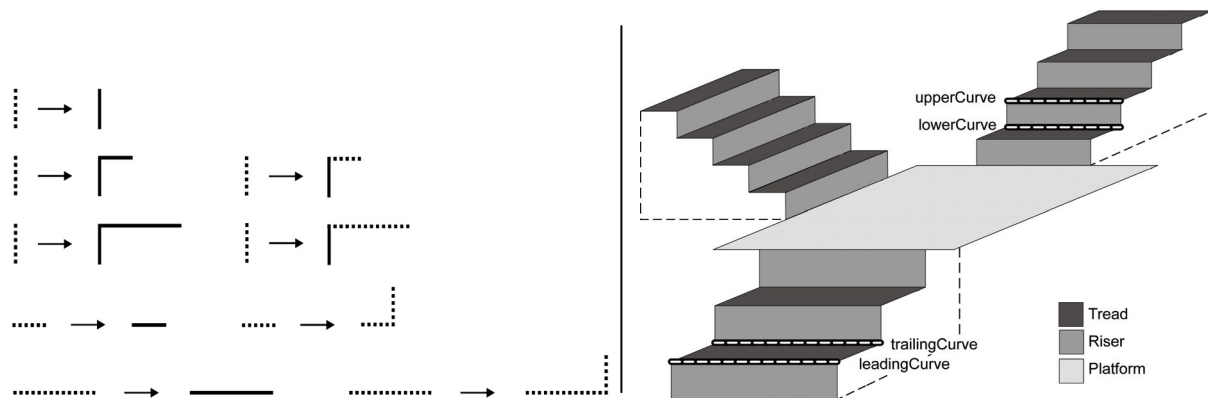


Abbildung 6 (links): Ersetzungsregeln einer Gestaltgrammatik für Treppen (Seitenansicht auf Stufenkombinationen): Nichtterminalsymbole sind gestrichelt dargestellt, Terminalsymbole durchgezogen. (rechts): Beispiel für eine mit der Grammatik und dem Modell aus Abb. 5 realisierbare Treppe.

Werden die Objekte dieser Grammatik ins Dreidimensionale übertragen, indem die dargestellten Linien in Flächen überführt werden, so können auch Treppenmodelle generiert werden, bei denen mehrere Treppenläufe von einem Podest abgehen (siehe Abb. 6 rechts).

Wie in Abschnitt 2.1.1 angedeutet, ist die vorgestellte Treppenmodellierung insofern redundant, dass einerseits die Treppengeometrie explizit durch ihre Randflächen (und damit auch der entsprechenden Kanten) angegeben, sie andererseits aber auch parametrisch in Form der Stufenanzahl, Steigungen und Auftrittstiefen spezifiziert werden kann. Ziel ist es, aus der Beobachtung einzelner Treppenflächen und -kanten auf eine konsistente parametrische Darstellung zu schließen. Probleme entstehen dabei insbesondere dadurch, dass Unregelmäßigkeiten der zu rekonstruierenden Treppe, aber auch fehlerhafte und unvollständige Beobachtungen zu einer Verletzung der durch die Gestaltgrammatik vorgesehenen regelmäßigen Struktur führen. Bzgl. der Verwaltung dieses Widerspruchs haben BRENNER (2005, 2004) und KOLBE (1999) in ihren Arbeiten bereits Modelle vorgestellt, die die Relaxation von Bedingungen auf geometrischen Primitiven erlauben. Eine Übertragung dieser Konzepte auf Modelle, die durch Gestaltgrammatiken beschrieben werden, ist jedoch noch nicht erfolgt. Dies soll im weiteren Verlauf des Projekts adressiert werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde gezeigt, dass in virtuellen 3D-Stadtmodellen der Übergang vom Gelände zum Gebäude ab einem bestimmten Detaillierungsgrad (LOD3) nicht mehr durch eine scharf abgrenzende Bodenkante beschrieben werden kann, sondern vielmehr als eine unscharfe Region – der Gebäudekragen – aufzufassen ist. Zur Beschreibung des Gebäudekragens wurde ein detailliertes semantisches Modell der enthaltenen Objekte und Relationen entwickelt, wobei der Beitrag sich auf die beispielhafte Darstellung der Treppenmodellierung fokussiert, anhand derer sowohl die semantische Differenzierung als auch die Formgenerik deutlich wird.

Das vorgestellte statische UML-Klassendiagramm dient zum einen dem Aufbau einer 3D-Geodatenbank, die zur Speicherung von Rekonstruktionsergebnissen aber insbesondere auch als Schnittstelle zwischen verschiedenen Teilprozessen des Interpretationssystems verwendet wird. Zum anderen ist es Ausgangspunkt für die Definition einer Gestaltgrammatik, die die möglichen Primitivkombinationen und gültigen Formen parametrisch beschreibt und damit eine explizite Verbindung der generativen, parametrischen Geometriemodellierung mit der expliziten, akkumulativen Beschreibung der Objekte (durch ihre Flächen und Kanten) schafft.

Künftig wird es darum gehen, datengetrieben eine beschränkte Instanziierung im Rekonstruktionsprozess zu ermöglichen, da Gestaltgrammatiken aufgrund ihrer rekursiven Struktur prinzipiell beliebig große und beliebig komplexe Hypothesen erzeugen können. Besonderer Augenmerk wird dabei auf der Behandlung von Abweichungen von Beobachtungen in Bezug auf Grammatikregeln sowie der Handhabung und Propagierung von Unsicherheiten und Fehlern über die Produktionsregeln der Grammatik hinweg liegen.

5 Literaturverzeichnis

- BOOCH, G., RUMBAUGH, J., JACOBSON, I. 1997: Unified Modeling Language User Guide. Addison-Wesley.
- BRENNER, C. 2004: Modelling 3d Objects Using Weak CSG Primitives. In: Proc. of the XXth ISPRS Congress, 12-23 July 2004 Istanbul, Turkey, Band XXXV der Reihe IAPRS
- BRENNER, C. 2005: Constraints for Modelling Complex Objects. In: Stilla, Rottensteiner und Hinz (Hrsg.): Proceedings of the ISPRS Workshop CMRT 2005, Vienna - Austria, 29-30 Aug 2005, Band XXXVI der Reihe IAPRS, Seiten 49–54.
- COX, S., DAISY, P., LAKE, R., PORTELE, C., WHITESIDE, A. 2004: OpenGIS Geography Markup Language (GML 3.1), Implementation Specification Version 3.1.0, Recommendation Paper, OGC Doc. No. 03-105r1
- GRÖGER, GERHARD, JOACHIM BENNER, DIRK DÖRSCHLAG, RÜDIGER DREES, ULRICH GRUBER, KLAUS LEINEMANN UND MARC-OLIVER LÖWNER 2005: Das Interoperable 3D-Stadtmodell der SIG 3D. Zeitschrift für Vermessungswesen, 130:343–353.
- HERRING, J. 2001: The OpenGIS Abstract Specification, Topic 1: Feature Geometry (ISO 19107 Spatial Schema), Version 5. OGC Document Number 01-101
- KOLBE, THOMAS H. UND GERHARD GRÖGER 2006: CityGML - OGC konforme Standards für 3D-Stadtmodelle. In: Tagungsbd. des Symposiums Praktische Kartographie, Königslutter.
- KOLBE, THOMAS H., GERHARD GRÖGER UND LUTZ PLÜMER 2005: CityGML - Interoperable Access to 3D City Models. In: Proceedings of the 1st International Symposium on Geoinformation for Disaster Management, Delft, The Netherlands, Springer Verlag.
- KOLBE, THOMAS.H. 1999: Identifikation und Rekonstruktion von Gebäuden in Luftbildern mittels unscharfer Constraints. Dissertation, Hochschule Vechta.
- OMG 2003: UML 2.0 OCL Specification.
- STEINHAGE, VOLKER 1999: Zur automatischen Gebäuderekonstruktion aus Luftbildern. Habilitationsschrift an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät, Universität Bonn.
- STINY, G. UND J. GIBS 1972: Shape Grammars and the Generative Specification of Painting and Sculpture. In: Freeman und Griffith (Hrsg.): Proceedings of IFIP Congress 71, Volume 2 - Applications, Ljubljana, Yugoslavia, August 23-28, 1971., Seiten 1460–1465.