

CityGML Semantik unter der Lupe – welche Konsequenzen ergeben sich für die Validierung von 3D Stadtmodellen?

DETLEV WAGNER¹, EGBERT CASPER² & VOLKER COORS²

Zusammenfassung: CityGML ist als semantisch-geometrisches Datenmodell für 3D Stadtmodelle bekannt. Im Zuge der Verbesserung der Datenqualität von 3D Stadtmodellen ist die Entwicklung von Prüfroutinen für valide Geometrie inzwischen weit fortgeschritten. Semantische Anteile der Modelle bleiben in der Regel jedoch unbeachtet, obwohl das semantische Modell neben der Geometrie eigenständiger und wesentlicher Bestandteil eines Datensatzes ist. Die Kohärenz der beiden nebeneinander bestehenden Modelle ist dabei wesentlicher Bestandteil von CityGML.

Ein Konzept zur unabhängigen Validierung des semantischen Modells auf Grundlage von eindeutigen Regeln wird im Paper vorgestellt. Es kann um die Validierung geometrisch-semantischer Kohärenz erweitert werden, worauf an Hand konkreter Beispiele Bezug genommen wird.

Das Paper geht von der Semantik von Objekten der realen Welt aus und konkretisiert diese an Hand eines thematischen Beispiels, wie etwa Gebäude, und stellt Bedingungen für ein valides Gebäude auf. Diese Bedingungen umfassen die Existenz, Anzahl sowie geometrische Ausprägung und Anordnung von Bestandteilen des Gebäudes, wie etwa den Wänden, dem Dach und der Grundfläche. Dies dient als Grundlage zur Ableitung von eindeutigen Regeln, welche dem semantischen Konzept zugrunde liegen und die im semantischen Konzept von CityGML ihre Entsprechung finden sollten. Kann keine eindeutige Regel abgeleitet werden, so ist die Bedingung in der vorliegenden Form nicht eindeutig und kann bei der Validierung keine Verwendung finden.

Mit Hilfe des semantischen Modells von CityGML kann dann eine eindeutige Formalisierung der Regeln abgeleitet werden, die eine automatisierte Validierung unterstützt. Die Eindeutigkeit der Formalisierung ermöglicht somit erst unabhängige und nachvollziehbare Validierungsergebnisse. Beispielhafte Regeln, auch mit Bezug zur geometrisch-semantischen Kohärenz, werden vorgestellt und erforderlichenfalls Parameter und Toleranzen eingeführt sowie die Umsetzung in Prüfroutinen dargestellt. Die Grenzen derart eindeutiger und klar ableitbarer semantischer Restriktionen werden abschließend diskutiert.

1 Einleitung

3D-Stadtmodelle existieren inzwischen in einer Vielzahl von Varianten und Datenformaten, wobei sich CityGML als gemeinsamer Standard u.a. zum Datenaustausch etabliert hat. CityGML stellt ein ausgereiftes geometrisches und semantisches Datenmodell bereit. Die in den Modellen enthaltene semantische Information ist in vielen Anwendungsbereichen entscheidend, auch im Hinblick auf deren kohärentem Zusammenspiel mit der Geometrie. Die Sicherstellung der Kohärenz der beiden Bereiche liegt jedoch allein in der Verantwortung des Datenerstellers und wird nicht implizit vom CityGML-Datenmodell gefordert. Vielmehr verweist das

¹ Universität Teheran, Department of Cartography, E-Mail: dwagner4@gmx.at

² Hochschule für Technik Stuttgart, Fakultät Vermessung, Informatik und Mathematik, Schellingstr. 24, 70174 Stuttgart, E-Mail: [egbert.casper, volker.coors]@hft-stuttgart.de

Standarddokument in Kapitel 6.3 auf die Bedeutung dieses Umstandes als einem der wichtigsten Gestaltungsleitsätze von CityGML (GRÖGER et al. 2012: 12). Daher ist die Validierung nicht nur hinsichtlich des geometrischen Modells erforderlich, sondern darauf aufbauend die Validierung der Semantik sowie der geometrisch-semantischen Kohärenz.

Ausgehend von der Semantik als Bedeutungslehre (Abschnitt 3) und sehr allgemein gehaltenen Gebäudedefinitionen (Abschnitt 4) werden Aussagen identifiziert, die teilweise durch Interpretation (Abschnitt 5) zur Grundlage von präzisen Anforderungen werden. In Abschnitt 6 werden diese mit den vom Building-Modul von CityGML bereitgestellten Features abgeglichen. Darauf aufbauend werden in Abschnitt 7 Regeln formuliert, die im Abschnitt 8 in geeigneter Weise formalisiert werden.

2 Problemstellung

Bei Datenmodellen wie X3D und glTF, die in der Computergraphik entwickelt wurden, stehen Geometrie und visuelle Erscheinung (Photometrie) im Vordergrund. Die Bedeutung der Geometrie wird i.d.R. allenfalls durch eine Assoziation von Semantik und Geometrie definiert. Im Gegensatz dazu steht in CityGML ein semantisches Modell im Vordergrund, räumliche Ausdehnung und Photometrie sind dem semantischen Modell als Attribute untergeordnet. Allerdings ist auch in CityGML keine formale Definition der Bedeutung von verwendeten Begriffen wie „Building“ gegeben. Für die automatisierte Validierung der semantisch-geometrischen Kohärenz ist eine formale Spezifikation dieser Begriffe aber unabdingbar. Bisherige Ansätze zur Validierung von CityGML Modellen prüfen beispielsweise, ob eine Gebäudegeometrie geschlossen ist. Auch das geometrische Modell eines Schokoladenhasen würde bei dieser Prüfung als valide Gebäudegeometrie akzeptiert werden.

Im vorliegenden Paper wird ein neuartiger Ansatz vorgestellt, der ausgehend von einer formalen Spezifikation von Begriffen Prüfregeln ableitet, mit der semantisch-geometrische Kohärenz validiert werden kann. Dies wird anhand des Beispiels *Gebäude* nachvollzogen und exemplarisch dargestellt.

Die Vorstellungen darüber, was ein Gebäude ist, wie es aussieht und strukturiert sein sollte, wo es sich befindet und wie seine Umgebung beschaffen sein kann, können individuell sehr weit auseinander gehen. Um diese Vorstellungen auf eine verbindliche Ebene zu bringen, ist es notwendig, einen Katalog von grundlegenden Anforderungen zu definieren, der die meisten Fälle abdecken kann und zugleich nicht so allgemein formuliert ist, dass die Variationsmöglichkeiten unüberschaubar werden. Auch im Hinblick auf standardisierte Qualitätsanforderungen und Interoperabilität ist dies erforderlich.

Es gilt herauszuarbeiten, wie weit diese Anforderungen gefasst werden können, um noch eine sinnvolle Modellierung zu gewährleisten, und ein Abdriften in die Beliebigkeit zu vermeiden.

3 Semantik und semantische Modelle

Semantik im weiteren Sinne beschäftigt sich mit der Bedeutung von Zeichen. In der Linguistik sind diese Zeichen Phoneme bzw. Grapheme, in der Informationstechnologie sind damit

weiterführende domänenspezifische Konzepte gemeint. Semantische Modelle dienen somit vornehmlich der konzeptuellen Modellierung.

Im Bereich der 3D Stadtmodelle spielen sowohl semantische als auch geometrische Modelle eine Rolle. Beides sind konzeptuelle Modelle, die einen bestimmten fachspezifischen Aspekt beschreiben. Während das geometrische Modell ein Konzept zur Modellierung der räumlichen Eigenschaften von Objekten definiert, umfasst das zugehörige semantische Modell die Definition der jeweiligen Bedeutung dieser Objekte und ihrer Beziehungen zueinander. Beide Modelle können isoliert voneinander existieren, werden aber in der Praxis meist kombiniert. Da sie den selben Gegenstand zum Thema haben, ist eine Grundforderung für einen validen Datensatz die Kohärenz von geometrischer und semantischer Modellierung (STADLER & KOLBE 2007).

4 Semantik von Gebäuden

Jedes Modell stellt im Idealfall eine für die fachspezifische Anwendung geeignetes Konzept zur Abstraktion eines Objektes der Realwelt dar. Im Folgenden wird am Beispiel des Gebäudes nachvollzogen, wie dieser Abstraktionsprozess verlaufen kann, und welche Schlüsse sich daraus für das Modell ziehen lassen. Zunächst wird dazu eine Definition für das Gebäude benötigt, die z.B. so aussehen kann:

Definition 1:

„Gebäude sind selbstständig benutzbare, überdeckte bauliche Anlagen, die von Menschen betreten werden können und geeignet oder bestimmt sind, dem Schutz von Menschen, Tieren oder Sachen zu dienen“ (BAUMINISTERKONFERENZ 2002).

Es gibt weitere Definitionen, die jedoch ähnlich allgemein gehalten sind. Die Ableitung von allgemeinen Eigenschaften gestaltet sich angesichts der Vielzahl vorkommender Gebäudearten i.d.R schwierig. Diese Vielzahl umfasst alle Varianten zwischen einem simplen quaderförmigen Einraumgebäude und hochkomplexen Bauten wie etwa Kathedralen oder repräsentativen öffentlichen Gebäuden. Hinzu kommen noch die Variationen in der Gebäudegröße, die sich zwischen wenigen Metern und mehreren Hundert Metern Seitenlänge und Höhe bewegen kann. Dennoch werden all diese Varianten unter ein und demselben Konzept Gebäude zusammengefasst. Es könnten also weitere Gemeinsamkeiten existieren, die eine Subsummierung unter einem Dach rechtfertigen und über den allgemeinen Ansatz der obigen Definition hinausgehen.

Die obigen Anmerkungen zum Variantenreichtum bei Gebäuden legen den Fokus unbewusst auf deren geometrische Ausprägung. Man wird wohl große Schwierigkeiten haben, auf diesem Wege Gemeinsamkeiten herauszuarbeiten. Anders sieht es aus, wenn man die Semantik hinzunimmt.

Dann lassen sich unmittelbar weitere Anforderungen aus der Definition ableiten:

1. Gebäude sind *selbstständig benutzbar*
Ein Gebäude hat eigenständigen Charakter, es erfüllt seinen Zweck unabhängig von seiner Umgebung. Dazu sollte es ein in sich abgeschlossenes Objekt sein.
2. Gebäude sind *überdeckt*
Das Gebäude besitzt ein Dach. Wände oder Boden sind demnach nicht zwingend.
3. Gebäude sind *bauliche Anlagen*
Im Unterschied zu natürlich vorkommenden Objekten ist ein Gebäude ein künstlich errichtetes Objekt.

4. Gebäude *können von Menschen betreten werden*
Eine Mindestgröße muss gegeben sein, um menschlichen Zugang ungehindert zu gewährleisten.

5. Gebäude sollen *Schutz bieten*
Gebäude dienen einem bestimmten Zweck. Hier wird auf die Funktion des Gebäudes verwiesen, die Schutz im weitesten Sinne für Menschen, Tiere und Sachen bedeutet.

Dass die Definition immer noch sehr weitreichend ist, zeigt sich an Gebäuden wie überdachten Haltestellen oder Wachhäuschen, die ebenso darunter fallen wie etwa große offene Lagerstellen, z.B. für Baumaterialien, solange diese eine Überdachung besitzen.

Ein anderer Ansatz wird von der Definition bei ALKIS verfolgt:

Definition 2:

“Gebäude' ist ein dauerhaft errichtetes Bauwerk, dessen Nachweis wegen seiner Bedeutung als Liegenschaft erforderlich ist sowie dem Zweck der Basisinformation des Liegenschaftskatasters dient” (ALKIS).

Hier liegt der Fokus auf der Funktionsweise des zugrundeliegenden Systems und weniger beim Gebäude selbst. Das Gebäude ist in diesem Fall lediglich ein wegen seiner Bedeutung als Liegenschaft zu verwaltendes Objekt. Das Gebäude besitzt somit zur Verwaltung erforderliche Fachinformationen.

Dennoch lassen sich weitere Anforderungen ableiten:

6. Das Gebäude wurde *dauerhaft* errichtet,
7. und ist *ortsfest* (da es sich um eine Liegenschaft handelt).
8. Zudem muss es eine nicht näher spezifizierte *Bedeutung* haben, um als Liegenschaft qualifiziert zu sein. Letztlich ist diese Bedeutung länderabhängig und ergibt sich aus der Anwendung der rechtlichen Rahmenbedingungen für das Katasterwesen.

Dies sind nur zwei von vielen möglichen Definitionen zur konkretisierten Darstellung des Konzeptes Gebäude. Man kann deutlich erkennen, dass entsprechend dem Anwendungsbereich der Fokus der jeweiligen Definition unterschiedlich ausfallen kann. Entsprechend verschiebt sich der Bedeutungsgehalt der Definition und somit des Definiendums Gebäude. Unterschiedliche Definitionen desselben Gegenstandes bedingen demnach semantische Abweichungen. Diese können sich ergänzen, in manchen Fällen jedoch auch widersprüchlich sein. Letztlich ist der Anwendungsbereich maßgeblich, um zu entscheiden, ob die Definition eines semantischen Konzepts für diesen geeignet ist.

Unser Anwendungsbereich ist die 3D-Modellierung einer Stadt. Bestehende Konzepte basieren in der Regel auf formalisierten Modellbeschreibungen, wie etwa KML, CityGML oder Openstreetmap3D. Diese enthalten implizite oder explizite Definitionen der zu modellierenden Objekte, in jedem Fall aber exakte Definitionen der sie repräsentierenden Modelle. Am Beispiel von CityGML wird dies im folgenden Abschnitt erläutert.

5 Regeln für valide Semantik

Die Ableitung von Regeln aus den in Abschnitt 4 genannten Bedingungen und Einschränkungen muss in einer Art und Weise geschehen, die nachvollziehbar von den eindeutig abgeleiteten Aussagen zu eindeutig definierten und überprüfbaren Regeln führt. Im Rahmen des CityGML

Quality Interoperability Experiments des OGC (COORS & WAGNER 2015) wurde ein Prozessmodell nach der Business Process Model Notation (BPMN) Spezifikation entwickelt, welches dies für CityGML Conformance Requirements sicherstellt. Dieses Modell kann in seiner allgemeinen Form dazu dienen, um aus den in Abschnitt 4 genannten Bedingungen (Test Requirements, TR) konkrete Regeln für valide Semantik zu formulieren. (Abb. 1).

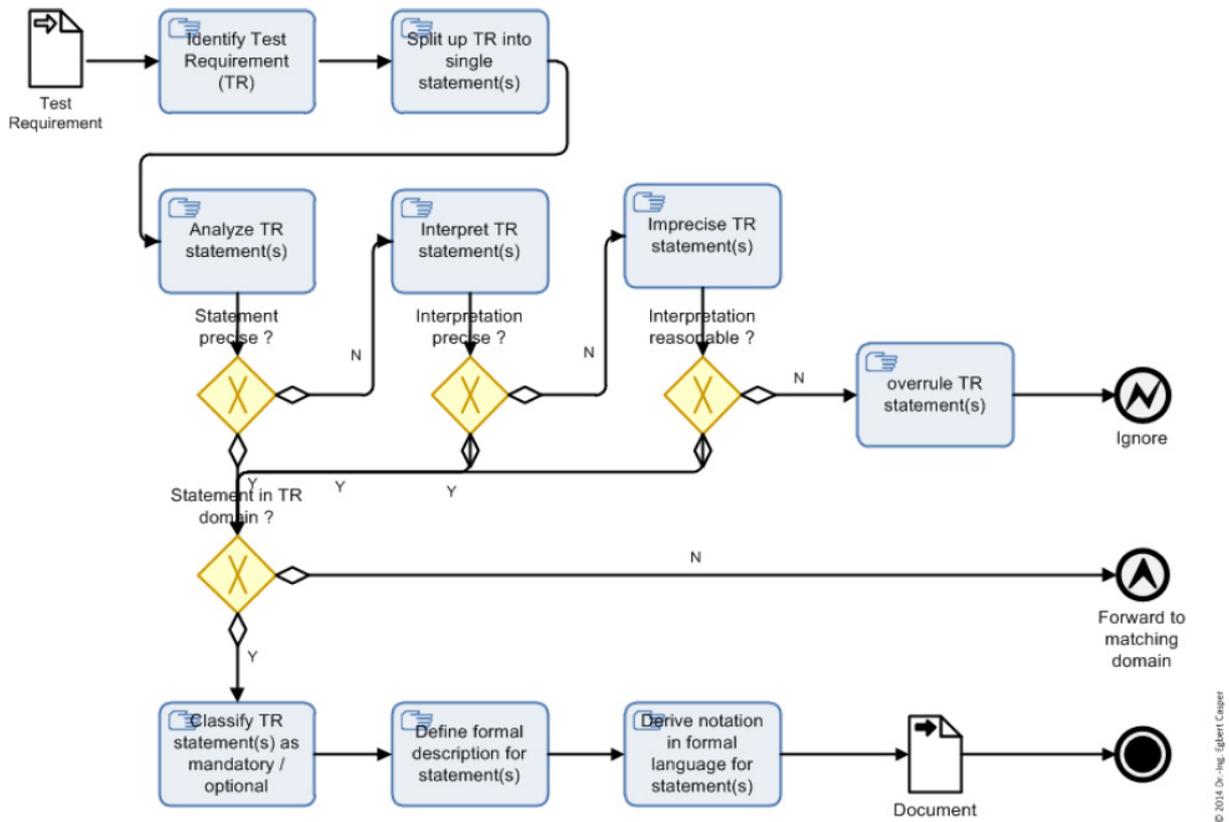


Abb. 1: BPMN-Prozessmodell zur Analyse von Testbedingungen (© E.Casper).

Der erste Schritt ist die Identifizierung von Bedingungen, die ein Gebäude definieren. Diese Bedingungen wurden am Beispiel zweier Definitionen in Abschnitt 4 identifiziert und in einzelne jeweils mit einer Nummer versehene Aussagen aufgeteilt. Jede einzelne Aussage wird im Folgenden auf ihre Eignung als eindeutig überprüfbares Kriterium untersucht (siehe Tab. 1).

Tab. 1: Analyse der Gebäudedefinitionen.

Nr.	präzise?	interpretierbar?	vernünftig?	Bereich
1	Nein	Ja	Ja	Geometrie/Semantik
2	Ja	-	-	Geometrie/Semantik
3	Nein	Ja	Ja	Semantik
4	Nein	Ja	Ja	Geometrie/Semantik
5	Nein	Ja	Ja	Semantik
6	Ja	-	-	Semantik
7	Ja	-	-	Geometrie
8	Nein	Ja	Ja	Semantik

Die meisten Kriterien bedürfen einer weiteren Interpretation, da sie ansonsten zu wenig präzise sind. Die Interpretation kann in allen Fällen für den Bereich der 3D Stadtmodelle so klar gefasst werden, dass die Ableitung von formalen Regeln möglich sein sollte. Die Unterscheidung der Regeln in verpflichtende oder optionale Regeln ist hier nicht erforderlich, da die Zugehörigkeit zum Bereich des Konzeptes *Gebäude* unstrittig ist. Wichtig ist vielmehr, ob die jeweilige Aussage einen rein semantischen Bezug hat oder auch die Geometrie betrifft. Bevor eine weitere Ableitung formaler Regeln erfolgt, wird noch der Zusammenhang zwischen Realwelt-Gebäuden und dem Building-Modell von CityGML untersucht.

6 Semantik von *Building*-Features in CityGML

Die Semantik erstreckt sich im Rahmen von CityGML auf die Ausprägungen der jeweils modellierten Objekte (etwa *Building*) sowie deren Teilen (z.B. *BuildingInstallation*). Die semantische Ausprägung wird hier also zum einen als Label genutzt, um ein bestimmtes Objekt mit einem Typ aus dem vorhandenen Katalog der CityGML-Features zu klassifizieren, zum anderen wird auf diesem Weg die Aggregationshierarchie beschrieben (eine bestimmte *BuildingInstallation* ist Teil eines bestimmten *Building*-Features). Die semantische Beschreibung von Objekten umfasst weiterhin Attribute (z.B. *function*) und Relationen.

Eine explizite Definition des zugrundeliegenden Realwelt-Objekts *Gebäude* existiert in diesem Zusammenhang jedoch nicht. Ebenso wird der Anwendungsbereich des Konzepts implizit durch Verwendung von umgangssprachlichen Begriffen wie *building* oder *room* festgelegt, die teilweise nur in bestimmten Level of Detail (LOD) verwendet werden dürfen. So sind z.B. *BoundarySurface* nur für die LOD 2-4 zulässig. Das bedeutet zugleich einen semantischen Informationsmangel für Modelle in LOD 0 und 1, der Hand in Hand mit deren geometrischer Vereinfachung geht.

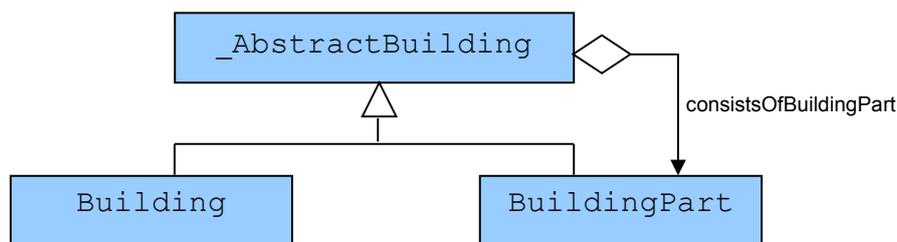


Abb. 2: Die Klasse *_AbstractBuilding* des *Building*-Moduls von CityGML.

Die Klasse *Building* ist neben der Klasse *BuildingPart* eine Spezialisierung der abstrakten Klasse *_AbstractBuilding* (Abb. 2). Daran zeigt sich, dass die beiden Klassen Gemeinsamkeiten besitzen, die sie aus der Basisklasse erben. Sie unterscheiden sich lediglich durch die Aggregationsmöglichkeit des *BuildingPart*. Das bedeutet, dass ein aus mehreren Teilen bestehendes Gebäude durch ein *Building* (repräsentiert den Hauptteil) sowie einem oder mehreren *BuildingParts* (repräsentieren untergeordnete bauliche Elemente) modelliert werden soll. Die sich daraus ergebende Problematik, wie denn die unterschiedlichen Teile (so vorhanden) voneinander abgegrenzt werden sollen, kann mit Hilfe der im Standard genannten Merkmale wie Dachform oder Geschosshöhe gelöst werden. Für die Unterscheidung zwischen

Hauptteil und untergeordneten Gebäudeteilen werden jedoch keine Angaben gemacht. Die Praxis zeigt, dass dies sehr unterschiedlich gehandhabt wird. Ein Ausweg wäre die Modellierung in der Weise, dass das *Building* lediglich als Container ohne eigene Geometrie, aber mit gemeinsamen Attributen, modelliert wird, der dann ein oder mehrere *BuildingParts* mit jeweils eigener Geometrie enthält. Diese Lösung wird von CityGML 2.0 jedoch nicht empfohlen. Gemäß dem ersten Conformance Requirement des Building Moduls soll die Geometrie des Gebäudehauptteils vom aggregierenden *Building*-Element repräsentiert werden (GRÖGER et al. 2012: 78).

Das *Building* Modell von CityGML enthält weiterhin die Features *BuildingInstallation* zur Repräsentation von An- und Aufbauten, sowie eine Reihe von *BoundarySurface*-Typen (Abb. 3), die die einzelnen flächigen Bauteile der Gebäudehülle darstellen. Diese können wiederum die Öffnungen *Door* und *Window* enthalten.

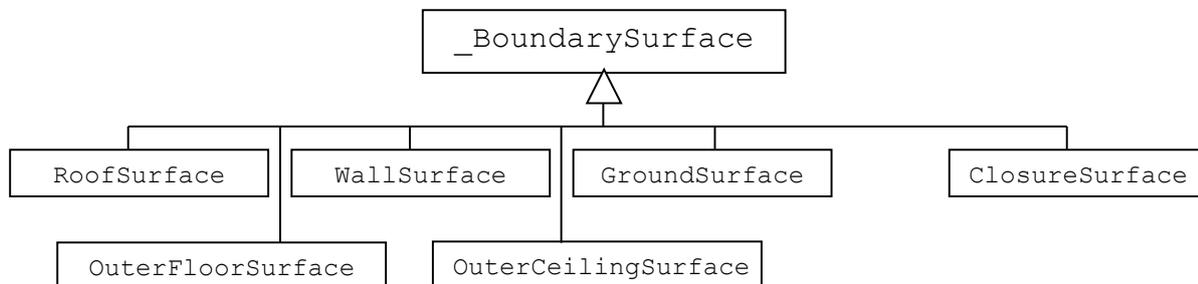


Abb. 3: Ausgewählte *BoundarySurface*-Feature Types in CityGML.

Auf die Features *IntBuildingInstallation*, *BuildingFurniture* und *Room* zur detaillierten Modellierung von Innenräumen wird in diesem Rahmen nicht weiter eingegangen.

Im Vergleich mit den in Abschnitt 4 herausgearbeiteten Gebäudeeigenschaften ergeben sich die in Tab. 2 gestellten Übereinstimmungen zwischen den Modellierungsmöglichkeiten im Rahmen von CityGML und den Anforderungen an Gebäude der Realwelt.

Tab. 2: Eigenschaften von Realwelt-Gebäuden und deren CityGML Repräsentation.

Nr.	reales Gebäude	CityGML Repräsentation
1	selbständig benutzbar	Building::usage
2	bedeckt	BoundarySurface::RoofSurface
3	bauliche Anlage	Building
4	können von Menschen betreten werden	Building::measuredHeight
5	bietet Schutz	Building::function
6	dauerhaft	Building::yearOfConstruction
7	ortsfest	Geometry::srsName, plus Koordinaten
8	Bedeutung	Building::class

Umgekehrt haben die unterschiedlichen *BoundarySurface*-Typen natürlich auch Entsprechungen in der Realwelt, ebenso wie die verschiedenen *BuildingInstallation*-Typen. Da diese Entsprechungen intuitiv sind und um die Aussagen des CityGML-Standard Dokuments nicht zu wiederholen, werden sie hier nicht näher erläutert. Interessant sind jedoch die dort gemachten

Einschränkungen, die sich etwa auf die Ausrichtung der Flächen im Raum beziehen. So wird gefordert, dass die Flächennormale von *GroundSurface* und *OuterCeilingSurface* nach unten, diejenige von *OuterFloorSurfaces* hingegen nach oben, weist. Zusätzliche Einschränkungen gibt es lediglich hinsichtlich der Verwendung in bestimmten Levels of Detail.

7 Regeln für Semantik

In der bisherigen Abhandlung steht das semantische Modell von Gebäuden im Vordergrund, die Beziehungen (sofern existent) zum geometrischen Modell werden nun im Zuge der Regelformulierungen berücksichtigt.

Bis auf die Hinweise im Standard zur Normalenrichtung einiger *BoundarySurface*-Typen sind explizite Aussagen zur Geometrie von semantischen Features nur selten anzutreffen. Dies belegt die Notwendigkeit für Regeln, die die Beziehung der beiden Modelle zum Gegenstand haben, um somit die vom Standard in Kapitel 6.3 geforderte geometrisch-semantische Kohärenz eines Stadtmodells möglichst sicherzustellen (GRÖGER et al. 2012).

Aussage 1 (vgl. Abschnitt 4) besagt, dass ein Gebäude selbständig benutzt werden kann. Geometrische Implikationen lassen sich insofern ableiten, als dass das Gebäude abgeschlossen sein sollte. Die Folgerung daraus wäre eine geschlossene Geometrie der Gebäudehülle, im Idealfall repräsentiert durch ein *Solid*. Die Regel für CityGML dazu lautet:

(A) Ein *Building* muss eine Solid-Geometrie besitzen.

Dies steht zunächst im Widerspruch zu offenen Lagerhallen oder Schuppen (Abb. 4). CityGML bietet in diesem Möglichkeit an, nicht vorhandene Wände mittels *ClosureSurface* zu modellieren und damit eine geschlossene Gebäudehülle mit virtuellen Anteilen herzustellen (Abb. 5).



Abb. 4: Schuppen mit einer offenen Seite.

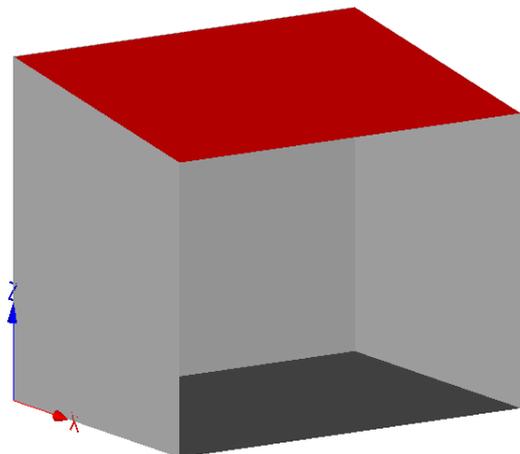


Abb. 5: Modell des Schuppens, vorne eine nicht sichtbare *ClosureSurface* zum Abschluss der Gebäudehülle.

Die zweite Aussage fordert eine Bedeckung des Gebäudes. Es muss somit eine oder mehrere Flächen vorhanden sein, die das Gebäude nach oben hin abschließen. Das deckt sich auch mit der von CityGML geforderten Normalenrichtung von *RoofSurface*-Features.

(B) Ein *Building* muss ein *RoofSurface* besitzen.

Weiterhin kann folgende Definition bei der Validierung des semantischen Modells nützlich sein, womit auch die Sonderfälle wie Zwiebelturmdach bei Kirchen etc. abgedeckt sein sollten:

Eine Wand ist eine vertikale Struktur. Sie wird nach oben von einem Dach und nach unten von einer Grundfläche begrenzt. Ein Gebäude umschließt ein Volumen („offene“ Volumen können mit *ClosureSurface* abgeschlossen werden, vgl. Abb. 5), Teile des Gebäudes (Dachflächen) können über die Wandflächen hinausragen.

Daraus folgt:

(C) Ein Strahl oberhalb des Gebäudes in negativer z-Richtung (0,0,-1) muss als erstes ein *RoofSurface* schneiden (manchmal kann dies auch ein *OuterFloorSurface* sein).

Anmerkung: Analog zu (C) schneidet ein Strahl ausgehend von einem beliebigen Punkt innerhalb des Volumens in Richtung (0,0,-1) als letztes eine Grundrissgeometrie (*GroundSurface*, ggf. *OuterFloorSurface*). Nur Flächen, die so geschnitten werden, sind Grundrissflächen. (Das gilt bei Dachflächen nicht, siehe Zwiebeltürme).

Als zusätzliche Konsequenz ergibt sich, dass auch in LOD1 die Dachflächen zwingend erforderlich sind. Das semantische Modell ergibt sonst keinen Sinn bzw. ist nicht überprüfbar. Durch die Einschränkung von *BoundarySurface*-Features auf die LOD >2 ist das semantische Modell in LOD 1 nur sehr rudimentär anwendbar.

In der dritten Aussage wird eine bauliche Anlage gefordert, um das Gebäude von naturräumlichen Objekten mit ähnlicher Gestalt oder Funktion abzugrenzen. Die Geometrie spielt in diesem Fall keine Rolle.

(D) Es muss ein *Building*-Objekt existieren

Aussage 4 verlangt eine Mindestgröße, so dass Gebäude von Menschen betreten werden können. Diese Mindestgröße lässt sich einerseits aus der Geometrie ablesen (z.B. Grundfläche), andererseits gibt das Attribut *measuredHeight* Auskunft über die Gesamthöhe.

(E) Die Gebäudegeometrie muss eine bestimmte Mindestfläche und –höhe aufweisen.

(F) Das Attribut *measuredHeight* (falls existent) muss einen Mindestwert überschreiten.

Aussage 5 bezieht sich auf die Schutzfunktion des Gebäudes und korreliert mit dem Attribut *function*. Die Geometrie ist dabei unerheblich.

(G) Das Attribut *function* (falls existent) muss einem bestimmten Wertebereich entsprechen

Im sechsten Fall geht es um die Dauerhaftigkeit des Gebäudes. Diese kann anhand des Temporärattributes *yearOfConstruction* (falls existent) belegt werden.

(H) Das Attribut *yearOfConstruction* hat einen Wert, der auf ein Datum in der Vergangenheit verweist.

Aussage 7 verlangt ein ortsfestes Gebäude. Dies wird durch fixe Koordinatenpunkte innerhalb eines Referenzsystems sichergestellt.

(I) Ein *Building* muss eine Geometrie besitzen.

Die achte Aussage hebt auf die Bedeutung eines Gebäudes ab, ohne nähere Angaben dazu zu machen. Letztlich kann sie ihren Niederschlag im Attribut *class* finden.

(J) Das Attribut *class* (falls existent) liegt in einem bestimmten Wertebereich.

Weitere Regeln können direkt aus Vorgaben des Standards abgeleitet werden, wie etwa Richtungen der Normalenvektoren von *BoundarySurfaces* (bei Dach- und Bodenflächen nach oben, Wandflächen zur Seite und Deckenflächen nach unten) sowie Beziehungen zwischen Gebäudeteilen (Ein *BuildingPart* bzw. eine *BuildingInstallation* benötigt ein *Building* als Elternelement). Für Details dazu wird auf (WAGNER et al. 2013) verwiesen.

8 Formalisierung mit RDF und GeoSPARQL

Die in Abschnitt 7 angeführten Regeln sollen im nächsten Schritt Eingang in eine automatisierte Prüfung finden. Die dazu nötige Formalisierung wird im Rahmen eines Resource Description Frameworks (RDF) verwirklicht. Die Bedingungen können dann mit Hilfe der Abfragesprache GeoSPARQL (<http://www.opengeospatial.org/standards/geosparql>) formuliert werden. Es ist eine Erweiterung von SPARQL zur Abfrage von Geodatenätzen, die die Möglichkeit bietet, Semantik *und* Geometrie unter einem Dach gemeinsam zu verarbeiten. Bisher sind geometrische Beispiele nur aus dem 2D-Bereich vorhanden, wobei 3D Geometrie grundsätzlich kein Problem darstellen sollte. Die Untersuchungen sind hier erst im Anfangsstadium, da als Zwischenschritt zunächst die Übertragung der CityGML-Features nach RDF erfolgen muss, z.B. mit einer an CityGML angelehnten und in als RDF definierten Ontologie. Ein Beispiel für die Features *Building* und *BuildingPart* wird hier vorgestellt.

Zunächst ist dazu das *Building/BuildingPart*-Konzept aus CityGML in Form einer RDF-Ontologie zu definieren (Listing1). Dazu wird die XML-Notation RDF/XML verwendet. Im Sinne der Semantik des *BuildingPart* als untergeordnetem Teil des Gesamtgebäudes wird es hier als Subclass des *Building* definiert.

Listing 1: Ontologiebeispiel in RDF/XML

```
<rdf:RDF
  xmlns:rdf="http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#"
  xmlns:rdfs="http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#"
  xmlns:owl="http://www.w3.org/2002/07/owl#"
  xmlns:dc="http://purl.org/dc/elements/1.1/"
  xmlns:cd="http://www.citydoctor.eu/CityGML-rdf/">

  <!-- OWL Header Example -->
  <owl:Ontology rdf:about="http://www.opengis.net/citygml/2.0">
    <dc:title>CityGML Ontology for Building module</dc:title>
    <dc:description>Ontology example for testing semantic validation
of Building features</dc:description>
  </owl:Ontology>

  <!-- OWL Class Definition - Building -->
  <owl:Class rdf:about="http://www.opengis.net/citygml/2.0#Building">

    <rdfs:label>Building</rdfs:label>
    <rdfs:comment>The CityGML Building feature.</rdfs:comment>
  </owl:Class>
  <!-- OWL Subclass Definition - BuildingPart -->
  <owl:Class rdf:about="http://www.opengis.net/citygml/2.0#BuildingPart">

    <!-- BuildingPart is a subclassification of Building-->
    <rdfs:subClassOf
rdf:resource="http://www.opengis.net/citygml/2.0#Building"/>
```

```
    <rdfs:label>BuildingPart </rdfs:label>
    <rdfs:comment>The CityGML BuildingPart feature.</rdfs:comment>
  </owl:Class>
</rdf:RDF>
```

Nun existieren *Building* und *BuildingPart* in einer Form, die mit GeoSPARQL abgefragt werden kann. Die Abfrage, ob eine Solid-Geometrie vorliegt, könnte prototypisch so aussehen wie in Listing 2 dargestellt. Zunächst werden alle *Building*- und *BuildingPart*-Elemente selektiert, die sich berühren (`geo:sfTouches`). Dann wird die kombinierte Geometrie aus allen Teilen gebildet (`geof:union`) und letztlich diese nach der Eigenschaft `geo:isSolid` abgefragt. Letzteres ist eine in GeoSPARQL nicht vorhandene Eigenschaft, deren Implementierung auf anderem Weg sichergestellt werden muss. Das Resultat sind alle Gebäudekomplexe mit Solid-Geometrie. Ist die Ergebnismenge leer, so liegt keine Solid-Geometrie vor und somit die Daten nicht valide im Sinne der Solideigenschaft für Gebäude.

Listing 2: Prototypische GeoSparQL Abfrage

```
PREFIX geo: <http://www.opengis.net/ont/geosparql#>
PREFIX geof: <http://www.opengis.net/def/geosparql/function/>
PREFIX cd: <http://www.citydoctor.eu/CityGML-rdf/>
SELECT ?b ?bp
WHERE {
  ?b a ex:Building ;
  geo:hasGeometry ?bgeo .
  ?bp a ex:BuildingPart ;
  geo:hasGeometry ?bpgeo .
  ?bgeo geo:sfTouches ?bpgeo .
  geo:hasGeometry ?compgeo geof:union ?bgeo ?bpgeo ;
  ?compgeo geo:isSolid
}
```

Die Implementierung erfolgt über das JENA Framework (<http://jena.apache.org/>), das alle benötigten Teile als JAVA-API bereitstellt. Insbesondere sind dies die eigentliche RDF-API sowie eine API für SparQL. Daneben gibt es noch die Möglichkeit, einen sogenannten Triple-Store einzurichten, der die Daten persistent in der RDF-typischen Triplestruktur vorhalten kann und sich direkt mit SPARQL abfragen lässt.

9 Fazit und Ausblick

Regeln für die Semantik von Gebäuden im Allgemeinen und für *Building*-Features im Falle von CityGML können mit Hilfe eines Prozessmodells aus einfachen Definitionen abgeleitet werden. Diese Regeln bilden den Ausgangspunkt für die semantische Validierung von 3D-Stadtmodellen. Sie können unter Berücksichtigung des Anwendungsfalls weiter verfeinert werden, wobei darauf zu achten ist, dass die geforderten Einschränkungen eindeutig und präzise ausgedrückt werden können. Im Einzelfall ist eingehende Interpretation der Anforderungen gefragt, die ebenso vom Anwendungsfall beeinflusst werden kann.

Im Unterschied zur rein geometrischen Validierung von 3D-Stadtmodellen, die mit einem klaren Ergebnis abschließt, verbleibt bei der semantischen Prüfung zumeist ein Graubereich, der vom Anwender beurteilt werden muss und sich in der ‚weichen‘ Formulierung der Regeln niederschlägt.

Die Ausstattung der Regeln mit Parametern wie Wertebereichen, Toleranzen etc. erfordert vom Anwender genaue Kenntnis über den Einsatzbereich der zu prüfenden Daten, um eine sinnvolle Prüfkongfiguration zu erstellen. Den Grad der Abweichung legt der Nutzer des Modells fest, da nur er entscheiden kann, inwiefern die Abweichung im jeweiligen Einzelfall wünschenswert ist bzw. noch toleriert werden kann. Dies impliziert, dass absolute Aussagen über die Validität der Semantik nicht zielführend sind, da im Einzelfall immer wieder zulässige Ausnahmen auftreten können. Letztlich ergibt die Prüfung, ob die vorliegende Konfiguration von Geometrie und Semantik plausibel modelliert ist.

Weiterhin sind bestimmte Vorgaben des CityGML Standards schwierig zu interpretieren oder in einer Weise formuliert, dass deren Umsetzung kaum möglich ist. Ein Beispiel dafür ist die Unterteilung von Gebäuden in Hauptteil (*Building*) und baulich untergeordneten Teilen (*BuildingPart*). Abgesehen von der Abgrenzung der Teile untereinander ist es in vielen Fällen kaum möglich zu entscheiden, welcher der übergeordnete Teil sein soll. Eine Gleichwertigkeit aller Teile ist hingegen vom Standard nicht vorgesehen, da er zwingend die Existenz eines *Building*-Features verlangt.

Die Umsetzung der Regeln zur Semantikprüfung in eine formale Sprache wird in einem Prototyp mit RDF und GeoSparQL mit Hilfe des JENA-Frameworks erprobt. Die ersten Ergebnisse sind vielversprechend und werden weiter verfolgt. Damit soll eine Möglichkeit geschaffen werden, diese und weitere Regeln einfach zu implementieren und zu testen.

10 Literaturverzeichnis

- BAUMINISTERKONFERENZ, 2002: Musterbauordnung. www.is-argebau.de/lbo/VTMB100.pdf
- COORS, V. & WAGNER, D., 2015: CityGML Quality Interoperability Experiment des OGC. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band 24, T. Kersten (Hrsg.), 35. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, 16.-18. März 2015 an der Universität zu Köln, Tagungsband auf CD-ROM, 288-295.
- GRÖGER, G., KOLBE, T.H., NAGEL, C. & HÄFELE, K.-H., 2012: OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard V2.0. OGC Doc 12-019.
- STADLER, A. & KOLBE, T.H., 2007: Spatio-semantic Coherence in the Integration of 3D City Models. Proceedings of the 5th International Symposium on Spatial Data Quality. Enschede.
- WAGNER, D., BOGDAHN, J., WEWETZER, M., ALAM, M.N., PRIES, M. & COORS, V., 2013: Geometric-semantical consistency validation of CityGML models. Progress and New Trends in 3D Geoinformation Sciences, J. Pouliot, S. Daniel, F. Hubert, & A. Zamyadi (Hrsg.), Springer Berlin Heidelberg, 171-192.