

# Das interoperable 3D-Stadtmodell der SIG 3D

Gerhard Gröger, Joachim Benner, Dirk Dörschlag, Rüdiger Drees, Ulrich Gruber,  
Klaus Leinemann und Marc-Oliver Löwner

## Zusammenfassung

3D-Stadtmodelle werden in zunehmendem Maße von Kommunen oder Unternehmen mit hohem Aufwand erfasst. Damit diese Investitionen sich amortisieren, müssen diese Modelle offen für die vielfältigsten Aufgaben etwa aus den Bereichen Katastrophenmanagement, Standortplanung oder der Simulation von Schadstoff- oder Lärmausbreitung sein. Dies setzt jedoch voraus, dass nicht nur die reine Geometrie von urbanen Objekten erfasst wird, sondern ebenso deren semantische Eigenschaften, von der Ebene ganzer Objekte wie Gebäuden bis zu den kleinsten Bestandteilen und Teilobjekten wie Balkonen und Fenstern. Neben dieser Multifunktionalität ist eine weitere Voraussetzung für den Investitionsrückfluss, dass 3D-Stadtmodelle vielfältige Verbreitung finden und problemlos – zwischen verschiedenen Systemen, Formaten und Organisationen – ausgetauscht werden können. Geodateninfrastrukturen (GDI) bieten hierzu sehr gute technologische Voraussetzungen; die zur Einbindung von multifunktionalen 3D-Stadtmodellen nötige Standardisierung der semantischen und geometrischen Aspekte ist bisher jedoch noch nicht im ausreichenden Maße erfolgt. Diese Lücke füllt das interoperable 3D-Stadtmodell der Special Interest Group 3D (SIG 3D) der Initiative »Geodateninfrastruktur Nordrhein Westfalen« (GDI NRW) und seine Umsetzung *CityGML*. Es definiert die Semantik und Geometrie urbaner Objekte in einheitlicher Weise und dient so zum Austausch von 3D-Stadtmodellen für die vielfältigsten Anwendungen. Das Modell basiert auf dem Konsens der fast 70 Mitglieder der SIG 3D, die alle für 3D-Stadtmodelle relevanten Bereiche vertreten. Der Artikel gibt einen Überblick über das Modell der SIG 3D und fokussiert dabei auf das Gebäudemodell und das Digitale Geländemodell, die beide in unterschiedlichen Detaillierungsgraden repräsentiert sind.

## Summary

*An increasing number of municipalities and companies make efforts to build up 3D city models. These investments only pay off if these models are reused for manifold tasks and applications, for example disaster management, spatial planning, simulation of pollutant or noise dispersion, or navigation. The precondition for the suitability for these applications, however, is that the models are not restricted to comprise only geometrical properties, but in addition the structure and semantics of objects like buildings and object parts like balconies and windows. Besides being multi-functional, another prerequisite for the return of investment is, that 3D city models are widely distributed and can easily be exchanged between different formats, systems and organizations. Spatial data infrastructures (SDI) may be used to perform this task, but up to now there exists no appropriate standard being sufficient to specify multi-functional 3D city models. This gap is closed by the*

*3D city model of the »Special Interest Group 3D« (SIG 3D) of the initiative »Spatial Data Infrastructure North Rhine-Westphalia« (GDI NRW) and its implementation CityGML. It specifies the geometrical and semantic properties of urban objects in a unified way and thus may be used for exchanging 3D city models for a variety of applications. The model is the result of a consensus process of the approximately seventy SIG 3D members, coming from all fields concerned with 3D city models. The paper provides a survey of the SIG 3D city model and focuses on the building model and the digital terrain model, both being represented in different levels-of-detail.*

## 1 Einleitung

Aus dem Kreis der Nutzer von Daten mit Raumbezug entstehen mehr und mehr Anforderungen zur Erfassung, Visualisierung und Analyse von dreidimensionalen Geodaten, wie zum Beispiel 3D-Stadtmodellen. Besonders in den dicht besiedelten Stadtbereichen werden z.B. von Stadtplanern, Funknetzplanern und dem Katastrophenschutz größere Mengen hochgenauer 3D-Stadtmodelle benötigt, die aus einem digitalen Geländemodell, 3D-Gebäudedaten, Verkehrswegen und vielen weiteren Informationen bestehen. Die für die Erstellung und Nutzung notwendigen technischen Voraussetzungen sind in den vergangenen 15 Jahren im Zuge der Entwicklung der Informationstechnologie geschaffen worden. Um diesen technischen Fortschritt sinnvoll nutzen zu können müssen proprietäre Entwicklungen reduziert werden. Es muss eine Interoperabilität hergestellt werden, die Mindestanforderungen für die Erfassung kategorisiert, definiert und Standards für den Austausch von Daten schafft. Letzteres ist besonders wichtig, da nur so die für die Erstellung großflächiger 3D-Stadtmodelle notwendigen Investitionen langfristig gesichert und über den Vertrieb refinanziert werden können. Weiterhin sind Standards eine wichtige Grundlage für die Akzeptanz der 3D-Stadtmodelle, so dass die öffentliche Hand und Unternehmen sie in größerem Umfang einsetzen und damit mittelfristig den Nutzerkreis erweitern und so wiederum die Wirtschaftlichkeit erhöhen können.

Angesichts dieser Forderungen nach Interoperabilität hat sich aus den verschiedenen Nutzergruppen, Softwareherstellern und Datenerfassern die »Special Interest Group 3D« im Rahmen der Initiative zur Geodateninfrastruktur in Nordrhein-Westfalen gebildet. In diesem Gremium legen die Vertreter von Wirtschaft, Wissenschaft und öffentlicher Hand die Anforderungen an 3D-Datenmodelle fest, die den internationalen Standards der OGC und ISO entsprechen und diese ergänzen.

Definiert man die Interoperabilität wie z.B. in der ISO-Norm 2382-1 (ISO 2005) angegeben mit

»capability to communicate, execute programs, or transfer data among various functional units in a manner that requires the user to have little or no knowledge of the unique characteristics of those units«,

so lassen sich nach Bishr (1998) folgende sechs Ebenen der Interoperabilität definieren: die Anwendungssemantikebene, die Datenmodellebene, die Datenbankmanagementsystemebene, die räumliche Datenebene, die Hardware- und Betriebssystemebene sowie die Netzwerkprotokollebene. Die SIG 3D adressiert mit ihren Anstrengungen insbesondere die semantische Ebene, die System- und die Datenmodellebene. Daraus folgt, dass folgende Ziele erreicht werden sollen:

- eine eindeutige Semantik für den Bereich 3D-Stadtmodelle,
- ein einheitliches Datenformat für den Datenaustausch und
- eine plattform- und softwareübergreifende Zusammenarbeit einzelner Softwarebausteine.

In diesem Artikel wird in erster Linie der beschrittene Weg zur Sicherstellung des ersten Punktes, der semantischen Interoperabilität, die Schaffung einer einheitlichen Ontologie für 3D-Stadtmodelle, dargelegt.

Neben der Schaffung einer übergreifenden Semantik setzt das Modell der SIG 3D auf der vom Open Geospatial Consortium (OGC) spezifizierten und auf der ISO-Norm 19107 »Spatial Schema« (Herring 2001) und der XML-Syntax aufbauenden Geography Markup Language (GML) (Cox et al. 2004) in der Version 3.1 auf, um eine möglichst weit reichende Interoperabilität für den Datenaustausch zu schaffen.

Ausgehend von der Problematik, dass eine funktionierende Dateninfrastruktur einheitlicher Standards und Normen bedarf, soll an dieser Stelle kurz auf bereits existierende Normen und Standards eingegangen werden. Die beiden Begriffe werden hier für folgende

Sachverhalte genutzt: Eine technische Norm ist eine allseits rechtlich anerkannte und durch ein offizielles Normungsverfahren beschlossene, allgemein gültige sowie veröffentlichte Regel zur Lösung eines Sachverhaltes. Dagegen ist ein (Industrie-)Standard ein technischer Standard, der sich im Laufe der Jahre durch die Praxis vieler Anwender und verschiedener Hersteller, bei einer gewissen Problemstellung ein bestimmtes pragmatisches Regelwerk einzuhalten, als technisch nützlich und richtig erwiesen hat.

Die Einhaltung von Standards und Normen ist die Voraussetzung für eine (Geo-)Dateninfrastruktur, da es in diesem Kontext darum geht, einer möglichst großen, heterogenen Menge von Nutzern eine Menge von (Basis-) Daten, die aus heterogenen, voneinander unabhängigen Erfassungen stammen, interoperabel nutzbar zu machen. Im GIS-Bereich sind mit der Spezifikation von Normen derzeit die *Internationale Standardisierungsorganisation* (ISO) und hier insbesondere das *Technical Committee 211* (TC211) sowie die *Europäische Standardisierungsorganisation* (CEN) und auf nationaler Ebene das *DIN* befasst. Auf Seite der Standardisierungsorganisationen sind insbesondere das *Open Geospatial Consortium* (OGC) und die *Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland* (AdV) sowie im CAD/Architektursektor die *International Alliance for Interoperability* (IAI) relevant. Tab. 1 nennt die Standards und Normen, die im Modell der SIG 3D berücksichtigt werden, und charakterisiert ihre Rolle in diesem Kontext.

3D-Stadtmodelle dienen zurzeit – mit Ausnahme einiger weniger Bereiche wie z.B. der Funknetzplanung – ausschließlich dem Zweck der Visualisierung. Die Anwender sehen jedoch einen dringenden Bedarf an Modellen, die für die vielfältigsten Anwendungen z.B. aus den Bereichen der Planung, der Navigation und der Katastrophenvorsorge geeignet sind. Dies ergab eine kürzlich angefertigte Studie (Albert et al. 2003). Um diese Multifunktionalität zu gewährleisten, müssen neben den rein

Tab. 1: Relevante Normen und Standards im Kontext der SIG 3D

Standardisierungsorganisation	Norm/Standard	Fokus	Rolle im Modell der SIG 3D
ISO TC 211	ISO 19XXX	Geodaten	Basis der Modellierung
ISO TC 211	ISO 19107 / ISO 19136 / ISO 19137	Modellierung der raumbezogenen Eigenschaften	Basis für die Modellierung der raumbezogenen Eigenschaften
ISO TC 211	ISO 19113, 19114, 19138, 19115, 19139	Datenqualität und Metadaten	Basis für die Modellierung der Datenqualität und Metadaten
ISO TC 211	ISO 19119	Geodienste	Basis der Modellierung
OGC (Open Geospatial Consortium)	GML 3.1	Geographic Markup Language	Austauschformat
AdV	ALKIS / ATKIS	Fachinformationssysteme	Fremddatenbezug, Objektarten und -benennung
IAI (International Alliance for Interoperability)	IFC (Industry Foundation Classes)	Architekturmodelle	Fremddatenbezug, Vorgaben für die Innenraummodellierung

geometrischen auch die thematischen Eigenschaften – insbesondere von Teilobjekten wie Dachflächen, Fenstern, Türen, usw. – durch Attribute und Beziehungen zwischen Objekten angemessen repräsentiert sein, ebenso wie die hierarchische Aggregationsstruktur urbaner Objekte und die explizite Repräsentation topologischer Relationen zwischen Objekten, die vor allem für Analysen im Bereich der Erreichbarkeit, z. B. zur Ermittlung von Fluchtwegen, essenziell sind (z. B. Kolbe und Gröger 2005).

3D-Stadtmodelle liegen in unterschiedlichen Detaillierungsgraden (Level-of-Detail, LoD) vor, die in der Regel aus verschiedenen, voneinander unabhängigen Erfassungen hervorgegangen sind. Die SIG 3D unterscheidet fünf LoD, beginnend mit dem größten LoD 0 bis hin zu dem am höchsten aufgelösten LoD 4. Diese LoD differieren sowohl hinsichtlich des Umfangs an modellierten Objektarten als auch bezüglich der Anforderungen an den Detailreichtum und die geometrischen Genauigkeiten. Der LoD 0 ist ein Regionalmodell, das im Wesentlichen aus einem Digitalen Geländemodell besteht, auf das ggf. ein Satelliten-/Luftbild oder eine Karte drapiert ist. Der LoD 1 ist das bekannte Blockmodell, das weder Dachstrukturen noch Texturen enthält. Beides kommt erst im LoD 2 hinzu, während im Architekturmodell LoD 3 differenzierte Dach- und Fassadenstrukturen geometrisch ausgeprägt sind. Der LoD 4 fügt Strukturen im Inneren von Gebäuden zu dem Modell hinzu. Zu jedem LoD werden entsprechende Erfassungskriterien und Genauigkeitsanforderungen angegeben. Die LoD 1 bis 3 entsprechen den in der Literatur (z. B. Königer und Bartel 1998) behandelten Detaillierungsgraden, während die LoD 0 und 4 Ergänzungen der SIG 3D sind.

Der Zweck der Differenzierung in die fünf LoD im Kontext von 3D-Stadtmodellen und Geodateninfrastrukturen liegt zum einen in der Herstellung der Vergleichbarkeit von Datensätzen durch deren Klassifikation, die bei der Datenintegration eine wertvolle Unterstützung liefert. Zum anderen stellen die LoD auch ein wichtiges Qualitätskriterium dar, anhand dessen ein Anwender die Eignung von Daten für einen konkreten Zweck beurteilen kann.

Das Stadtmodell der SIG 3D erhebt den Anspruch, dreidimensionale Geobasisdaten bereitzustellen. Weitergehende Fachinformationen sind nicht enthalten, können aber durch das Konzept der *Fachdatenverbindung* bereitgestellt werden. Diese ermöglicht durch die explizite Speicherung des Identifikators desselben Objekts in einem Fachinformationssystem den Zugriff auf fachspezifische Informationen in diesem System. Jedes thematische Objekt gleich welcher Granularität – vom Gebäudekomplex bis hin zum einzelnen Fenster – kann eine oder mehrere solcher Fachdatenverbindungen haben. Durch die Möglichkeit, ein Gebäudeobjekt im Stadtmodell mit dem entsprechenden ALKIS®-Objekt zu verknüpfen, besteht z. B. die Möglichkeit, Grundriss- und weitergehende Attributinformationen aus dem Liegenschaftskataster zu nutzen, ohne redundante Daten zu führen. Ebenso ist das

zukünftig noch näher zu betrachtende Problem der Laufendhaltung damit zu lösen. Die Katasterbehörden unternehmen zur Zeit große Anstrengungen, die Aktualität des Gebäudebestandes zu erhöhen sowie die Geschäftsprozesse der Fortführung des Gebäudedatenbestandes zu optimieren, die auch genutzt werden können, um vorhandene 3D-Stadtmodelle aktuell zu halten.

Das in diesem Artikel vorgestellte 3D-Stadtmodell wird seit Mitte 2002 von der Arbeitsgruppe »Modellierung« der »Special Interest Group 3D« (SIG 3D) entwickelt. Nähere Informationen hierzu sind unter [www.ikg.uni-bonn.de/sig3d](http://www.ikg.uni-bonn.de/sig3d) zu finden. Die SIG 3D ist Teil der Landesinitiative »Geodateninfrastruktur (GDI) NRW«, deren Ziel die Aktivierung des Geodatenmarktes und die Schaffung der Voraussetzungen für den erleichterten Zugang zu Geodaten ist. In der SIG 3D arbeiten derzeit ca. 70 Mitglieder aus den Bereichen Wissenschaft, Verwaltung, GIS-Softwareproduktion, Datennutzer und Datenprovider aktiv mit. Der Teilnehmerkreis beschränkt sich längst nicht mehr auf NRW: Neben den Verwaltungen der wichtigsten Kommunen Nordrhein-Westfalens (z. B. Düsseldorf, Essen, Dortmund, Köln, Wuppertal, Kreis Recklinghausen) sind auch die Städte Berlin, Hamburg und Bremen beteiligt, ebenso wie GIS-Hersteller und Organisationen aus der Schweiz, Österreich und Großbritannien oder Datennutzer in internationalen Konzernen.

## 2 Das Basismodell

Das Basismodell ermöglicht die konsistente und einheitliche Definition der geometrischen und topologischen Eigenschaften der thematischen Geo-Objekte des 3D-Stadtmodells. Es stellt die entsprechenden Grundbausteine für punkthafte (nulldimensionale), linienhafte (eindimensionale), flächenhafte (zweidimensionale) und volumenhafte (dreidimensionale) Geo-Objekte zur Verfügung. Ebenso kann die Geometrie von Objekten angegeben werden, deren Dimension noch zu spezifizieren ist.

Das Basismodell besteht aus Primitiven, die sich zu Aggregaten zusammensetzen. Flächenhaften Aggregaten können Materialeigenschaften wie eine Farbe oder eine Textur zugewiesen werden. Abb. 1 zeigt das Basismodell in Form eines Klassendiagramms der grafischen Modellierungssprache *UML (Unified Modelling Language)* (Booch et al. 1997). Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten detailliert vorgestellt.

### 2.1 Geometrisch-topologische Primitive

Das Basismodell stellt Primitive zur Modellierung von null- bis dreidimensionalen Geo-Objekten (vgl. die weiß dargestellten Klassen in Abb. 1) bereit. Es orientiert sich an dem in der Computer-Grafik und im GIS-Bereich bekannten Konzept der *Boundary Representation* (Foley

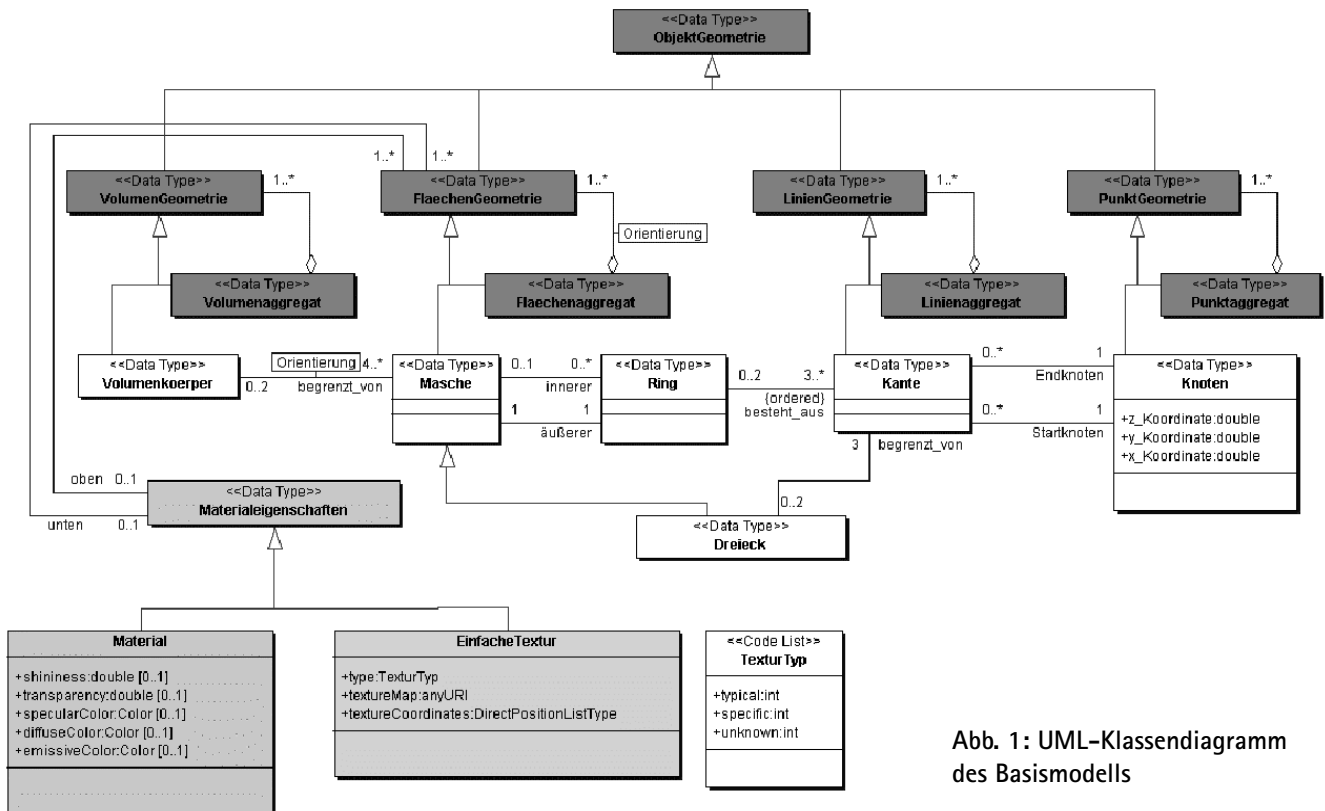


Abb. 1: UML-Klassendiagramm des Basismodells

et al. 1995, Herring 2001). Die Primitive sind topologisch miteinander verknüpft. Dreidimensionale Primitive, die *Volumenkörper*, werden von zweidimensionalen Primitive, den *Maschen*, begrenzt. Diese wiederum sind durch *Ringe* definiert, die sich aus eindimensionalen Primitive, den *Kanten*, zusammensetzen. Eine Masche wird durch genau einen Ring nach außen und ggf. innere Ringe begrenzt, die Aussparungen in der Masche wie z.B. Fenster in einer Wand bilden.

Eine wichtige Eigenschaft der Primitive ist ihre gegenseitige Durchdringungsfreiheit: Zwei Primitive dürfen sich höchstens in ihren Rändern berühren und der Ort dieser Berührung muss durch ein Primitiv definiert sein, das beide Primitive begrenzt. Diese Eigenschaft der topologischen Komplexe (Herring 2001, Jänich 2004) gewährleistet saubere Übergänge zwischen Objekten, ohne Klaffungen und Durchdringungen. Dies ist vor allem für Visualisierungen von Bedeutung, aber auch für Analysen wie Volumenberechnungen oder die Ermittlung von Nachbarschaften.

## 2.2 Aggregate

Oft bestehen Geo-Objekte aus mehreren Primitive, die untereinander eine Bestandteilshierarchie bilden. Ein Gebäude besteht z.B. aus Gebäudeteilen unterschiedlicher Höhe, die wiederum aus Teilen wie z.B. einer Garage oder einem Anbau bestehen. Diese Hierarchie ist im Basismodell durch die Aggregationsebene (in Abb. 1 dunkelgrau dargestellt) repräsentiert. Eine *Volumengeometrie* kann z.B. entweder ein *Volumenaggregat* sein, das wieder-

rum aus *Volumengeometrien* besteht, oder ein primitiver *Volumenkörper*. Dieses Entwurfsmuster der rekursiven Aggregation für jede Dimension bietet größtmögliche Flexibilität, da die Tiefe der Rekursion – die Anzahl der Bestandteilebenen – nicht beschränkt ist.

Die Klassen *Volumen-*, *Flächen-*, *Linien-* und *Punktgeometrie*, die entweder Aggregate oder Primitive sein können, dienen zur Definition des Raumbezugs von Geo-Objekten. Ist die Dimension der Geometrie nicht festgelegt, kann die allgemeinste Oberklasse *Objektgeometrie* verwendet werden.

## 2.3 Materialeigenschaften

Die Modellierung der Materialeigenschaften (in Abb. 1 hellgrau dargestellt) orientiert sich an dem 3D-Grafikstandard *X3D* (web 3D 2004), dem Nachfolger des VRML-Formats (VRML 1997). Jeder (aggregierten) Fläche kann wahlweise eine Farbe mit Angabe von Beleuchtungseigenschaften oder eine Textur zugeordnet werden. Die Textur kann jede Ressource insbesondere im Internet sein, angegeben durch eine *URI (Uniform Resource Identifier)*. Durch Angabe von Texturkoordinaten kann die Textur exakt zurechtgeschnitten und auf der Flächengeometrie positioniert werden.

Zur Beurteilung der Qualität von Texturen dient das Attribut *TexturTyp*, das spezifische, individuell für bestimmte Objekte angefertigte von solchen Texturen unterscheidet, die nur das typische Aussehen der Art des Geo-Objekts widerspiegeln und mehrfach verwendet werden.

## 2.4 Bezug zum ISO/OGC-Standard 19107 »Spatial Schema«

Das Basismodell kann durch die Konzepte der Norm »Spatial Schema« des OGC und der ISO (Herring 2001) realisiert werden. Diese Norm legt fest, wie der Raumbezug von null- bis dreidimensionalen Geo-Objekten definiert werden kann. Dabei ist jedoch die geometrische Beschreibung strikt getrennt von der topologischen, d. h. es sind eigene Klassen für Geometrie und Topologie vorgesehen, was zu einer unübersichtlichen Modellierung führt. Im Basismodell der SIG 3D ist dagegen beides in den Primitiven vereinigt. Die Abbildung der getrennten Klassen auf die entsprechenden Primitive erlaubt, das Basismodell durch die Konzepte von ISO »Spatial Schema« zu repräsentieren. Bei der Modellierung in ALKIS wird analog verfahren, indem das Konzept der »Simple Topology« (Herring 2001) angewendet wird. Dies beschränkt sich jedoch nur auf null- bis zweidimensionale Raumbezüge.

## 3 Das Gebäudemodell in verschiedenen Detaillierungsgraden

Entsprechend den in Kap. 2 spezifizierten Mindestanforderungen an modellierte Objekte eines LoD erfolgte die Ausgestaltung des entwickelten (semantischen) Anwendungsmodells. Die mit den Mindestanforderungen korrespondierenden Mindestanforderungen an die Geometriequalität und Abstandsmaße zwischen realem Objekt und dem Objekt im Modell sind noch Gegenstand der laufenden Diskussion in der SIG 3D und werden zu einem späteren Zeitpunkt publiziert.

Die durch die LoD-Modellierung gestufte Wahrnehmung des Kontinuums der Realität spiegelt sich somit in

der Modellierung wieder und hat zur Konsequenz, dass nicht alle modellierten Objekte in allen LoD präsent sein dürfen und auch nicht alle Aggregationsebenen auf allen LoD existieren. Im Modell der SIG 3D gehören alle Objektklassen bestimmten LoD an. Die Zuordnung der Objektklassen zu den Level-of-Detail erfolgt dabei an Hand der Mindestkriterien eines LoD und den zu erwartenden Dimensionen der entsprechenden Objekte einer Klasse. Im Folgenden werden insbesondere die Objektklassen vorgestellt und ihre LoD-Zuordnung dargelegt. Weiter ist noch zu erwähnen, dass ein Objekt für jeden LoD, in dem es erscheint, eine separate Geometrie haben kann.

Bei der Bezeichnung von Geometrieklassen wird hierbei vollständig auf die Bezeichnungen im Kap. 2 und der Abb. 1 zurückgegriffen. Die Modellierung von Gebäuden in den verschiedenen LoD ist in Form von UML-Diagrammen in Abb. 2 und 3 dargestellt.

### 3.1 Der Level-of-Detail 1

Der LoD 1 bildet innerhalb des Gebäudemodells die Basisstufe der Modellierung (vgl. Abb. 4). Aus semantischer Sicht bilden die Gebäude und ihre Bestandteile auf diesem LoD eine Einheit, beides wird daher nicht genauer ausdifferenziert. Es ist jedoch möglich, komplexe, d. h. aus Einzelgebäuden bestehende Gebäude oder Gebäudegruppen zu bilden. Dies ermöglicht es, den Zusammenhang z. B. zwischen einem Kraftwerks- oder Verwaltungstrakt und einem Krankenhausstrakt im Modell abzubilden. Als räumliche Repräsentation erhalten alle Gebäudeobjekte eine Volumengeometrie. Alle Modelle können ab dem LoD 1 mit Materialeigenschaften versehen werden, die Darstellungsinformationen für die Visualisierung enthalten. Um auch bei von verschiedenen Erfassern erzeugten

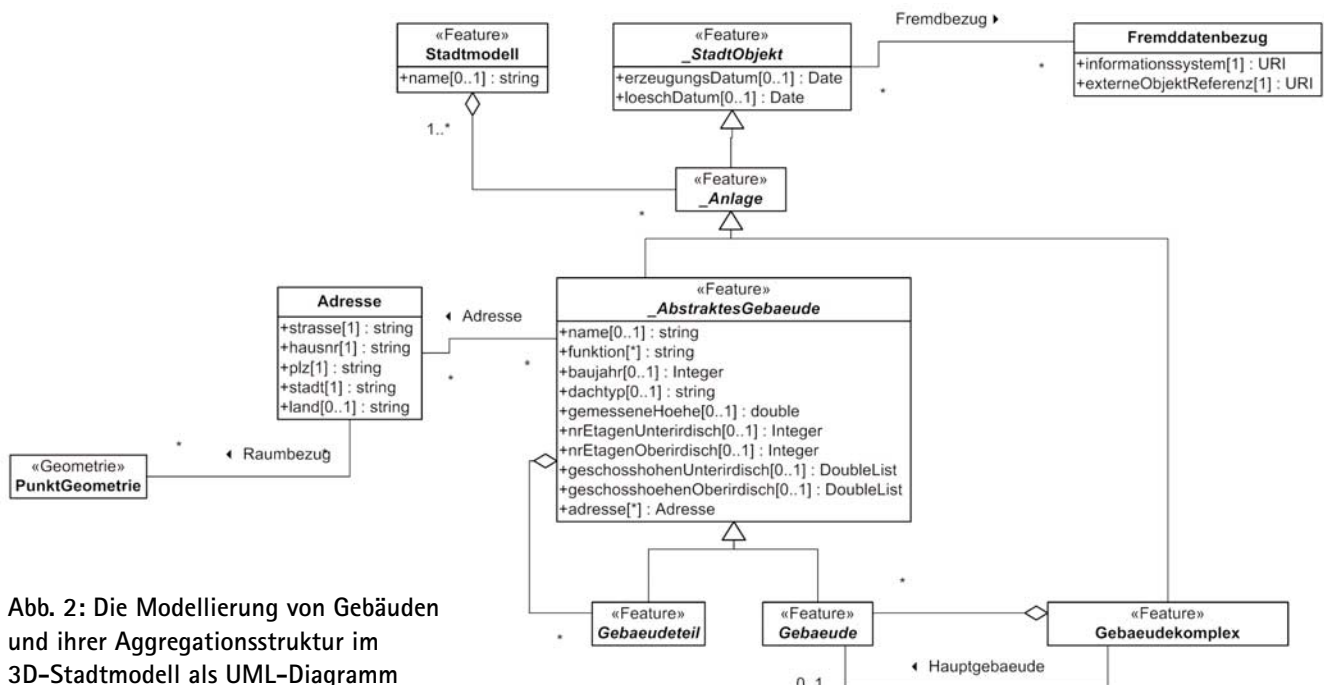


Abb. 2: Die Modellierung von Gebäuden und ihrer Aggregationsstruktur im 3D-Stadtmodell als UML-Diagramm

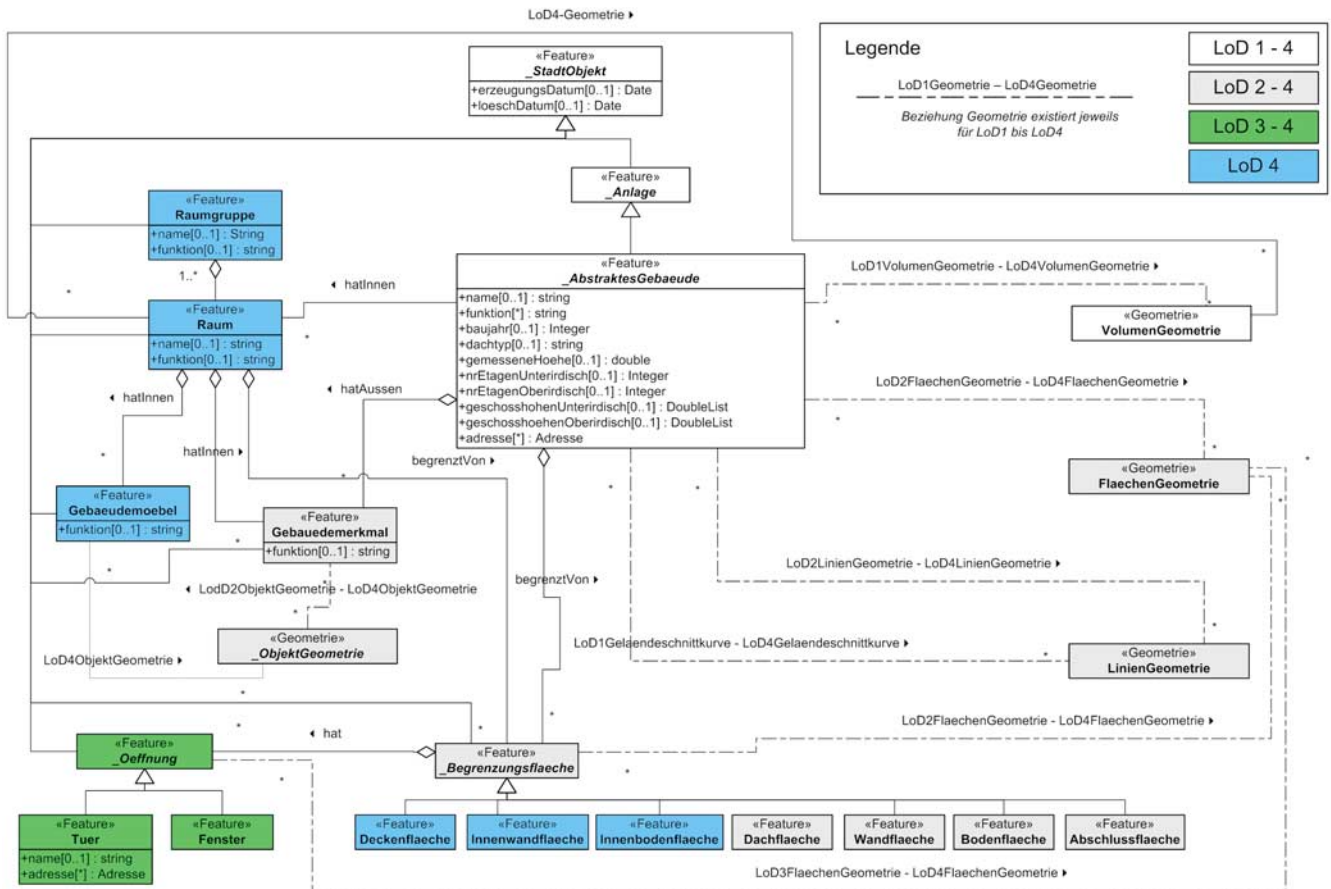


Abb. 3: UML-Klassendiagramm des Gebäudemodells in den LoD 1-4

Gebäuden und Geländemodellen eine Integration von Gebäuden mit dem Gelände zu ermöglichen, kann bei einem Gebäude eine *Geländeschnittkurve* angegeben werden, an welcher die Geländeoberfläche an das Gebäude anzuschließen ist.

Die hier vorgenommene Modellbildung ermöglicht insbesondere für den LoD 1 eine weitgehend automatisierte Ableitung von Stadtmodellldaten aus bereits vorhandenen 2D-Datenbeständen. Hierzu bieten sich insbesondere Daten des Katasters – in der Bundesrepublik ist dies die *Automatisierte Liegenschaftskarte (ALK)* oder zukünftig das *ALKIS® (Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem)* – an. In beiden Modellen werden die Grundrisse der Gebäude flächenhaft abgebildet. Unter Zuhilfenahme

von attributiv gespeicherter Höheninformation (Anzahl der Vollgeschosse) können aus den Begrenzungen dieser Flächen Seitenwände bzw. aus den Flächen Volumenkörper abgeleitet werden. Bundesweit beträgt der Erfassungsstand des digitalen Katasters ca. 90%. Der Aspekt des flächendeckenden Vorliegens ist vor allem deshalb wichtig, weil für die LoD-1-Daten insbesondere die Bereiche Funknetzplanung sowie Umwelt und Schadstoffausbreitung wichtige Anwendungsfelder sind (Albert et al. 2003). Diese erfordern aber eine weiträumige, flächendeckende Datenbasis.

### 3.2 Die Level-of-Detail 2 und 3

Das semantische Modell des LoD 2 stellt eine Erweiterung des LoD 1-Gebäudemodells dar (vgl. Abb. 5). Innerhalb des LoD 2 wird erstmals zwischen Gebäuden, seinen *Begrenzungsflächen (Wandfläche, Dachfläche, Bodenfläche oder Abschlussfläche)* und seinen *Merkmalen* (z.B. Balkon, Gaube) explizit unterschieden und diese erhalten jeweils eigene Bezüge zur Geometrie. Es sind also erstmals Aussagen über die semantische Eigenschaft einer Fläche als Wand und über deren Zugehörigkeit zu einem Gebäude möglich. Daneben kann einem Gebäude ab diesem LoD neben der Volumengeometrie auch eine ergänzende Flächengeometrie zugewiesen werden, um z.B. Dachüberstände zu modellieren. Anders als die Begrenzungs-



Abb. 4: LoD-1-Modell mit DGM und Gebäuden

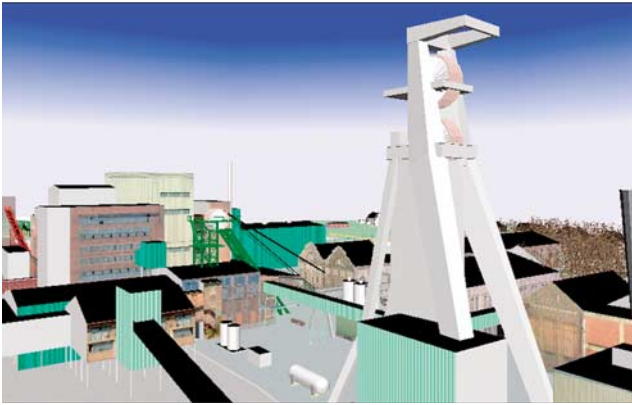


Abb. 5: LoD-2-Gebäude

flächen, die nur einen Bezug zur einer Flächengeometrie haben, können *Gebäudemerkmale* eine beliebig gestaltete Objektgeometrie besitzen und sind damit nicht auf einen bestimmten Geometriertyp festgelegt. Die in diesem Modell auftretenden Abschlussflächen dienen unter anderem zur Modellierung von Gebäuden, die keine geschlossenen Volumina bilden, wie z.B. eine Scheune, ein Hangar o.ä., wobei trotzdem die Möglichkeit der Volumenberechnung gegeben sein soll. Daneben besteht ab dem LoD 2 die Möglichkeit, linienförmige Gebäudemerkmale wie z.B. Antennen einem Gebäude anzugliedern.

Ab dem LoD 2 können die Modelle über die Materialeigenschaften ihrer begrenzenden Flächen mit individuellen oder generischen Texturen versehen werden, um sie realistisch visualisieren zu können. Insgesamt wird durch die zusätzlichen Möglichkeiten dieses LoD der Wiedererkennungswert erheblich gesteigert.

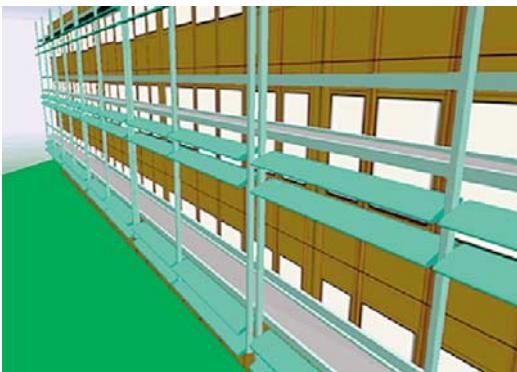


Abb. 6: LoD-3-Gebäude mit einem Gebäudemerkmal

Der LoD 3 wiederum stellt eine Erweiterung des LoD-2-Gebäudemodells dar (vgl. Abb. 6): Es treten zu den bisher eingeführten Klassen die *Öffnungen* (Türen und Fenster) hinzu. Geometrisch sollen die Objekte im LoD 3 in realer Form vorhanden sein; sie entsprechen also Architekturmodellen.

### 3.3 Der Level-of-Detail 4

Mit dem LoD 4 können die bereits beschriebenen semantischen Elemente geometrisch präziser dargestellt werden,

ergänzt um *Innenräume* (vgl. Abb. 7). Diese Erweiterung ermöglicht die virtuelle Begehbarkeit von Gebäuden, sie dient im Immobilienbereich beispielsweise der Beurteilung der Wohnqualität durch einen Blick aus dem Fenster oder durch die Darstellung der Beleuchtungssituation durch Tageslicht. Insbesondere dient die Erfassung der Räume aber auch der Unterstützung der Besucherführung und Besucherinformation beispielsweise in Museen (Location Based Services). Räume werden als Ganzes durch eine Volumengeometrie und/oder Flächengeometrie beschrieben, sie können aber auch semantisch weiter durch



Abb. 7: Das Innere eines Raumes in einem Gebäude im LoD 4

*Innenwandflächen, Deckenflächen und Innenbodenflächen* strukturiert werden. Räume können *Raumgruppen* bilden. Den Flächen eines Raumes können Materialeigenschaften und Texturen zugeordnet werden. Ein weiteres semantisches Objekt des LoD 4 ist die *Gebäudemöblierung*, die beispielsweise für die Darstellung von Sitzplätzen in Theatern verwendet werden könnte. Ein Teilproblem der Raummodellierung, das in der SIG 3D kontrovers diskutiert wurde, ist die Modellierung von Durchbrüchen, d.h. von Türen, Fenstern oder Durchgängen zwischen benachbarten Räumen. In der aktuellen Version des Stadtmodells werden die Laibungen (innere Wandflächen) der Durchbrüche den Räumen zugeordnet und evtl. durch eine Abschlussfläche begrenzt, um Raumvolumina berechnen zu können. Die Verbindungstopologie der Räume muss somit aus der Geometrie ermittelt werden. Eine Modellvariante wäre die Einführung eines Durchbruchs (Passage) als eigenständiges semantisches Objekt, das neben der Laibungsgeometrie Verweise auf die zu verbindenden Räume besitzen sollte. Durch diese Ergänzung würde die Verbindungstopologie explizit gemacht und die Nutzung des Modells beispielsweise für die Ermittlung von Fluchtwegen oder die Besucherführung vereinfacht.

Spätestens der hier erreichte Detaillierungsgrad wirft die Frage auf, woher solche Modelle kommen können. Diese Detaillierung nähert sich bereits der von CA(A)D-Modellen, so dass sich eine Verwendung von CA(A)D-Systemen zur Modellierung anbietet. Für diesen Datenaustausch existiert auch bereits ein eingeführter, geeigneter Standard der »International Alliance for Inter-

operability«, der *IFC-Standard* (International Alliance for Interoperability 2005, Adachi et al. 2005). Die IFC-Schnittstelle repräsentiert ein Produktdatenmodell für Gebäude (Eastman 1999), d. h. das Datenmodell umfasst alle für den Konstruktions- und Produktionsprozess erforderlichen Informationen, während das 3D-Stadtmodell der SIG 3D nutzungsorientierte Informationen erfordert. Die Transformation der IFC-Daten in das Modell der SIG 3D ist eine nicht-triviale Abbildung, die sowohl die Semantik als auch die Geometrie betrifft. Beispielsweise werden in IFC Wände als Körper in unterschiedlichster Weise modelliert, während das Modell der SIG 3D nur die sichtbaren Flächen benötigt, um einen Raum darzustellen. Arbeiten in diesem Bereich befinden sich im Experimentalstadium (Benner et al. 2005).

#### 4 Weitere Bausteine eines 3D-Stadtmodells

In einem Regional- und Stadtmodell muss die Möglichkeit bestehen, neben Gebäuden andere, vielfältige Geo-Objekte auf der Anwendungsebene zu modellieren. Dies umfasst in erster Linie das natürliche Relief oder Straßen als flächenhafte Objekte. Zur ersten Problematik gehört ebenfalls die Betrachtung von Brücken und Tunneln, die wesentliche Bestandteile einer Stadt, insbesondere für eine Fußgängernavigation, bilden.

##### 4.1 Das Relief

Ein Stadtmodell ist ohne die Modellierung der Geländeoberfläche nicht vollständig. Bei einer Visualisierung

eines Stadtmodells ohne unterliegendem Höhenmodell würden Gebäude im Nichts schweben, aber auch Straßen könnten nicht angemessen repräsentiert werden. Weiterhin wären wesentliche Analysen etwa im Hochwasserschutz oder in der Stadtplanung ohne eine flächenhafte Information über Geländehöhen unmöglich. Bei der Bereitstellung von Höhenmodellen für ein Stadtmodell ist es wichtig, eine möglichst große Freiheit hinsichtlich der Datenformate zu gewährleisten. Dies muss in Abwägung mit der angestrebten Interoperabilität geschehen. Bei der Integration der Höhendaten aus diversen Quellen und Gebäudemodellen müssen auch unterschiedliche Auflösungen und Genauigkeiten berücksichtigt werden.

Das hier vorgestellte Anwendungsmodell sieht daher eine Modellierung der Geländeoberfläche vor, die zum Einen verbreitete Datenformate für Reliefdaten unterstützt und zum Anderen eine möglichst individuelle Lösung der Interaktion von Gebäudemodell und Geländemodell ermöglicht.

Im Stadtmodell der SIG 3D (vgl. das UML-Diagramm in Abb. 8) wird das Relief durch die Klasse *Relief* repräsentiert, die für die LoD 0 bis 4 vorgesehen ist. Dabei ist die Auflösung und Genauigkeit des Höhenmodells nicht an die der Gebäuderepräsentationen gebunden; es wird also die Möglichkeit eröffnet, Gebäudemodelle höherer LoD mit Reliefdaten niedrigerer Auflösung und Genauigkeit zu verschneiden. Dies bietet die Möglichkeit der Ad-hoc-Visualisierung von Gebäudemodellen hoher LoD, ohne auf kostenintensive Datenakquisition hoch aufgelöster Geländedaten angewiesen zu sein. Durch die Ableitung der Klasse *Relief* und *ReliefKomponente* von *\_StadtObjekt* lässt sich eine Referenz zu zugehörigen Daten in externen Informationssystemen verwirklichen

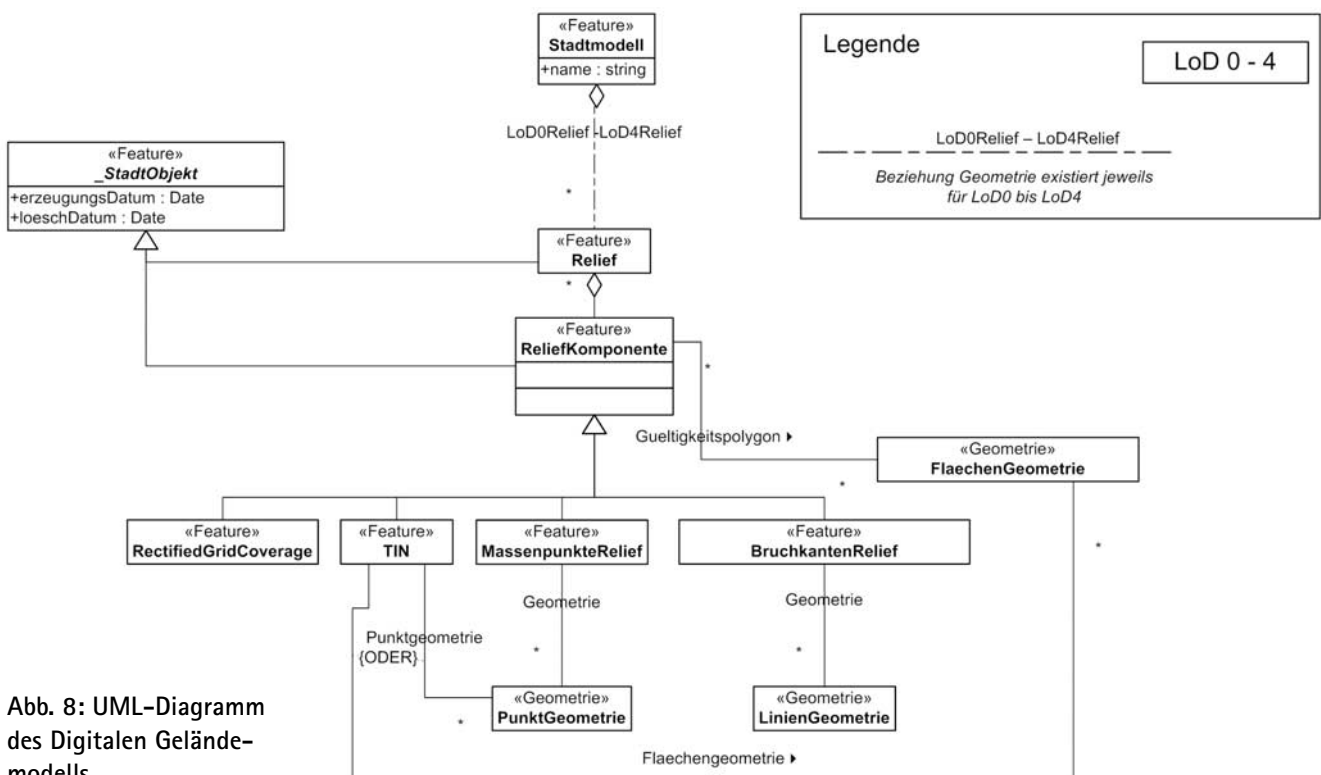


Abb. 8: UML-Diagramm des Digitalen Geländemodells



(vgl. Kap. 3). Die Klasse *Relief* hat genau eine festgelegte Ausdehnung in Form eines *Gültigkeitspolygons*, das den Geltungsbereich des Geländemodells festlegt, und besteht aus einem oder mehreren Instanzen der Klasse *Relief-Komponente*. Diese Klasse ist mit verschiedenen Konzepten der Höhenrepräsentation assoziiert, die auch nebeneinander existieren können. Ein Relief kann somit durch 3D-Masspunkte (*MassenpunkteRelief*), 3D-Bruchkanten (*BruchkantenRelief*), ein Dreiecksnetz (*TIN*) oder Rasterdaten (*RectifiedGridCoverage*) repräsentiert sein.

Bei der konkreten Repräsentation der Geländedaten wird so weit wie möglich auf GML-Klassen zurückgegriffen, um neben der Vielfalt der zulässigen Datenformate eine Interoperabilität mit anderen Informationssystemen zu gewährleisten. Dabei kommen der Dreiecksvermaschung und dem Raster die Hauptbedeutung zu.

Die Dreiecksvermaschung wird explizit durch Dreiecke mit begrenzenden Kanten oder implizit durch 3D-Punkte mit einer Triangulationsregel, z.B. der Delaunay-Triangulation oder der bedingten Delaunay-Triangulation, angegeben (vgl. Okabe et al. 1992). Typische Probleme der Integration von 2.5D-Höhenmodellen und 3D-Gebäudemodellen unterschiedlicher Auflösung stellen das »Versinken« oder »Schweben« der Gebäude im oder über dem Höhenmodell dar (vgl. Gröger und Kolbe 2003). Damit wird eine Anpassung des Höhenmodells nötig, um eine geometrische Konsistenz im Stadtmodell zu erhalten. Ebenfalls muss dafür gesorgt werden, dass auch das Höhenmodell entsprechend seines Datenformates konsistent dargestellt werden kann. Ein TIN darf also nicht etwa durch die Grundfläche eines Hauses einfach wahllos zerschnitten werden. Der Lösungsansatz der SIG 3D besteht dabei in der Nutzung des Konzepts der *Geländeschnittkurve* (vgl. Kap. 3), die wie Bruchkanten genutzt werden, so dass sich ein DGM nahtlos daran anschließen kann. Ggf. muss dazu eine Retriangulierung erfolgen. Liegt eine Geländeschnittkurve nicht vor, muss diese durch Schnittoperationen des Gebäudes mit dem DGM abgeleitet werden. Bruchkanten in TIN können natürlich auch zur Repräsentation geomorphologischer Strukturen im Gelände verwendet werden.

Rasterdaten werden im Stadtmodell der SIG 3D durch die GML 3-Klasse *RectifiedGridCoverage* repräsentiert (vgl. Cox et al. 2004), das seine Geometrie über die Klasse *RectifiedGrid* in Form eines Ursprungs und zweier Vektoren erhält. Diese müssen nicht zwingend achsenparallel sein.

#### 4.2 Unterirdische Objekte, Brücken und Wasserflächen

Neben den Gebäuden und dem digitalen Höhenmodell ist die Darstellung von weiteren Bauwerken wie Tunnels oder Brücken für die Vollständigkeit eines Stadtmodells unerlässlich. Beide Objekttypen interagieren direkt mit der Modellierung des Höhenmodells und müssen in kon-

sistenter Weise mit ihm in Zusammenhang gebracht werden können.

Wie bereits in Kap. 2 und 3 dargelegt, werden im 3D-Stadtmodell der SIG 3D Volumen durch geschlossene Randflächenbegrenzungen (Boundary Repräsentation) dargestellt. Volumen werden also aus den sie umgebenden Flächen gebildet, von denen mindestens vier vorhanden sein müssen (vgl. Abb. 1). Ein Tunnel bildet ein unter der Geländeoberfläche liegendes Volumen und muss mit der Oberfläche des Reliefs geometrisch korrekt verbunden sein. Der Lösungsansatz hierbei verläuft analog zu der Integration von Gebäuden in das Höhenmodell: Wie die Gebäudeschnittkurven können die Begrenzungskanten einer Tunnelöffnung im Gelände als *Bruchkante* modelliert werden. Dadurch wird erreicht, dass das Höhenmodell, das i. d. R. in schlechterer Auflösung vorliegt, an die hoch aufgelöste Geometrie der Tunnelöffnung angepasst wird. Anders als die Abschlussfläche des Gebäudemodells (vgl. Kap. 3), die zwingend planar ist, kann die Aussparungsfläche aus einem Polygon bestehen, das nicht in einer Ebene liegt.

Eine Aussparungsfläche kann auch allgemein zur Anpassung des Höhenmodells an bestimmte Flächennutzungen oder Geo-Objekte genutzt werden. Liegen Daten über Gewässer oder Seen vor, können diese mittels der Aussparungsfläche mit konstantem Höhenwert belegt werden. Durch rekursive Aggregation kann eine solche Aussparungsfläche wiederum eine Aussparungsfläche, ein Loch besitzen. Hiermit ist es ohne weiteres möglich, einem See zur Definition des Ufers eine Aussparungsfläche zuzuordnen, die wiederum eine Aussparungsfläche besitzt, die Informationen des Höhenmodells einer Insel beinhaltet.

Die Modellierung von Brücken als über dem Gelände befindliche Flächen ist für klassische Geoinformationssysteme immer ein Problem. Dieses wird im 3D-Stadtmodell der SIG 3D durch die Repräsentation einer *Bruecke* als Spezialisierung der Klasse *Anlage* gelöst. Dadurch kann ihr wie dem *\_AbstraktenGebaueude* eine Objektgeometrie zugeordnet und ihre Interaktion mit dem Relief mittels *Bruchkanten* gelöst werden. Auch die für viele Anwendungen wie etwa die Funknetzplanung wichtigen Objekte wie *Aufschüttung*, *Abgrabung* oder *Mauer* sind als Unterklassen der Klasse *Anlage* modelliert. Diese können bei Bedarf weiter spezialisiert werden.

### 5 Derzeitige Realisierung im Austauschformat GML 3

Um konkrete Datensätze des 3D-Stadtmodells austauschen und Interoperabilität auf der syntaktischen Ebene herstellen zu können, wurden das Basismodell, das Gebäudemodell und das DGM auf Konzepte der Beschreibungssprache GML in der derzeitigen Version 3.1.0 (Cox et al. 2004) abgebildet. Die sich ergebende XML-Anwendung wird als *CityGML* ([www.citygml.org](http://www.citygml.org)) bezeichnet.

GML setzt die geometrischen und topologischen Objekte, die in der ISO-Norm »Spatial Schema« definiert sind, nahezu unverändert um und bietet Mechanismen an, fachbezogene Klassen mit Ihren thematischen und räumlichen Eigenschaften gemäß der entsprechenden ISO-Norm 19109 »Rules for Application Schema« (ISO 2002) zu definieren. Insbesondere erlauben diese Regeln, einem thematischen Objekt mehrere Raumbezüge zuzuordnen, was vor allem für die Realisierung verschiedener Detaillierungsgrade notwendig ist. Die Modelle vieler kommerzieller GIS bieten diese Option nicht.

Das in Kap. 2 beschriebene topologisch-geometrische Basismodell könnte mit geringem Anpassungsaufwand durch die Elemente von GML 3 umgesetzt werden. Aus pragmatischen Gründen – um die Komplexität der und die Anforderungen an Einlese- und Schreibwerkzeuge für CityGML zu verringern – soll jedoch zunächst auf den Austausch topologischer Beziehungen verzichtet und nur eine reine geometrische Beschreibungen ausgetauscht werden. In der derzeitigen Version von CityGML sind die Klassen *Volumen-*, *Flächen-*, *Linien-* und *Punktgeometrie* folglich durch die geometrischen GML 3-Klassen *Solid*, *Surface*, *Curve* und *Point* realisiert. Werkzeuge zum Einlesen von CityGML-Daten können die Topologie bei Bedarf wieder rekonstruieren.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem 3D-Stadtmodell der SIG 3D der GDI NRW und seiner GML-Umsetzung CityGML stehen die technologischen Voraussetzungen für einen reibungslosen Austausch und die Verbreitung urbaner Daten zur Verfügung. Die Einbeziehung semantischer Aspekte erlaubt die multifunktionale Nutzung solcher Modelle weit über den heute noch vorherrschenden Zweck der Visualisierung hinaus. Durch die Umsetzbarkeit in die Sprache GML kann das Modell problemlos in Geodateninfrastrukturen (Groot und McLaughlin 2000), im Wesentlichen unter Nutzung des vom OGC spezifizierten *Web Feature Service* (Vretanos 2005), integriert werden.

Die Tragfähigkeit und Machbarkeit des Konzepts wurde durch die Projekte der zweiten Stufe des »Piloten 3D« Anfang des Jahres 2005 eindrucksvoll demonstriert. Fünf Konsortien implementierten spezifische Anwendungen für 3D-Stadtmodelle; die gemeinsame Schnittstelle CityGML ermöglichte den gegenseitigen reibungslosen Datenaustausch.

Die SIG 3D verfolgt das Ziel, CityGML als Standard in das OGC einzubringen und so die Nachhaltigkeit und die Zukunftssicherheit des Modells und darauf basierender Implementierungen zu sichern. Erste Vorstellungen in Gremien des OGC stießen auf durchweg positive Resonanz, so dass die Chancen auf einen OGC-Standard CityGML durchaus positiv zu beurteilen sind.

Eine zukünftige Aufgabe wird die Spezifikation fachspezifischer Anwendungsmodelle auf Basis des SIG-3D-

Modells sein, das die allgemeinen Anforderungen abdeckt. Beispiele hierzu sind das Katastrophenmanagement, die Simulation der Ausbreitung von Lärm oder ein 3D-Kataster. Die Erweiterbarkeit von GML erlaubt die Definition und reibungslose Integration solcher Modelle.

Während das Modell der SIG 3D die Interoperabilität auf der *semantischen* und *syntaktischen* Ebene sicherstellt, stellt die *geometrische* Integration heterogener Daten eine weitere Herausforderung dar. Im Kontext von Geodateninfrastrukturen müssen heterogene, aus verschiedenen Quellen und unabhängig voneinander erfasste Daten ad hoc geometrisch integriert werden (vgl. Gröger und Kolbe 2003). Mit den Konzepten der Gebäudeschnittkurve und des Gültigkeitspolygons bei DGM unterstützt das Modell der SIG 3D diese Integrationsprozesse; aus wissenschaftlicher Sicht sind hier jedoch noch eine Vielzahl von Problemen auf der Basis existierender Ansätze (z. B. Kampshoff 2005) zu lösen.

Ein weiteres Problem ergibt sich bei der Integration von Daten aus dem Bereich der Architektur und des Facility Management (AEC/FM), die aus Systemen des CAAD (Computer-Aided Architectural Design) stammen und dem Konzept des Constructive Solid Geometry (CSG) folgen. CSG-Daten können zwar in das im GIS-Bereich vorherrschende und auch in CityGML verwendete Modell der Boundary Representation transformiert werden; dabei gehen jedoch wertvolle Informationen z. B. über in dem Modell gültige Bedingungen verloren, die insbesondere die Fortführung unterstützen. Langfristig ist somit die Integration von CSG-Konzepten in GML bzw. CityGML eine weitere Herausforderung.

### Dank

Wir danken den weiteren Mitgliedern der Arbeitsgruppe »Modellierung« der SIG 3D der GDI NRW für die Mitwirkung an der Erstellung des 3D-Stadtmodells, insbesondere Thomas H. Kolbe, Frank Bildstein, Heinrich Geerling, Paul Hartfiel, Hardo Müller, Frank Knospe, Andreas Kohlhaas, Kai-Uwe Krause, Ulrich Krause, Udo Quadt, Martin Rechner, Hanns-Florian Schuster und Frank Thiemann.

### Literatur

- Adachi, Y., Forester, J., Hyvarinen, J., Karstila, K., Liebich, T., Wix, J.: Industry Foundation Classes IFC2x Edition 2, International Alliance for Interoperability, <http://www.iai-international.org>, 2003.
- Albert, J., Bachmann, M., Hellmeier, A.: Zielgruppen und Anwendungen für Digitale Stadtmodelle und Digitale Geländemodelle. Erhebungen im Rahmen der SIG 3D der GDI NRW. Verfügbar unter [http://www.ikg.uni-bonn.de/sig3d/docs/Tabelle\\_Anwendungen%20Zielgruppen.pdf](http://www.ikg.uni-bonn.de/sig3d/docs/Tabelle_Anwendungen%20Zielgruppen.pdf), 2003.
- Benner, J., Geiger, A., Leinemann, K.: »Flexible Generation of Semantic 3D Building Models«, Proc. »Next Generation 3D City Models«, Bonn, 21.–22.6.2005.
- Bishr, Y., Overcoming the semantic and other barriers to GIS interoperability. Int. Journal on Geogr. Information Science, Vol. 12, No. 4, 1998.
- Booch, G., Rumbaugh, J., Jacobson, I.: Unified Modeling Language User Guide. Addison-Wesley, 1997.
- Cox, S., Daisy, P., Lake, R., Portele, C., Whiteside, A.: OpenGIS Geography Markup Language (GML 3.1), Implementation Specification Version 3.1.0, Recommendation Paper, OGC Doc. No. 03-105r1, 2004.
- Eastman, C.M., Building Product Models: Computer Environments Supporting Design and Construction, CRC Press, 1999.

- Foley, J., van Dam, A., Feiner, S., Hughes, J.: Computer Graphics: Principles and Practice. Addison Wesley, 2nd Ed., 1995.
- Gröger, G. und Kolbe, T.H.: Interoperabilität in einer 3D-Geodateninfrastruktur. In: Bernhard, L., Sliwinski, A. & K. Senkler. Geodaten- und Geodienste-Infrastrukturen – von der Forschung zur praktischen Anwendung. Tagungsband der Münsteraner GI-Tage 2003. IfGI Prints 18, Universität Münster, 2003.
- Gröger, G., Kolbe, T.H., Plümer, L.: Mehrskalige, multifunktionale 3D-Stadt- und Regionalmodelle. Photogrammetrie, Fernerkundung, Geo-information (PFG) 2/2004.
- Groot, R., McLaughlin, J.D.: Geospatial Data Infrastructure – Concepts, Cases, and Good Practice. Oxford University Press, 2000.
- Herring, J.: The OpenGIS Abstract Specification, Topic 1: Feature Geometry (ISO 19107 Spatial Schema), Version 5. OGC Document Number 01-101, 2001.
- International Alliance for Interoperability: IFC 2x2 – Industry Foundation Classes. <http://www.iai-ev.de/spezifikation/ifc2x2/index.htm>, 2005.
- ISO/DIS 19109: Geographic information – Rules for application schema. ISO Technical Committee 211, Draft International Standard, <http://www.isotc211.org>, 2002.
- ISO/IEC 2382-1: Information Technology – Vocabulary – Part 1: Fundamental Terms. JTCC 1, 2005.
- Jänich, K.: Topologie. 8. Auflage, Springer 2004.
- Kampshoff, S.: Mathematical Models for Geometrical Integration. In: Gröger G. & T.H. Kolbe (Hrsg.): Proceedings of the First International ISPRS/EuroSDR/DGPF – Workshop on Next Generation 3D City Models, Bonn, Juni 21–22, 2005.
- Königer, A., Bartel, S.: 3D-GIS for Urban Purposes, *Geoinformatica*, 2(1), März 1998.
- Kolbe T.H., Gröger, G.: Towards unified 3D city models. In: Schiewe, J., Hahn, M., Madden, M., Sester, M. (Hrsg.): Challenges in Geospatial Analysis, Integration and Visualization II. Proc. of Joint ISPRS Workshop, Stuttgart, 2003.
- Kolbe T.H., Gröger G.: Unified Representation of 3D City Models. *Geo-information Science Journal*, Vol.4, No. 1, 2004.
- Kolbe, T.H., Gröger, G. und Plümer, K.: CityGML – Interoperable Access to 3D City Models. Proc. of the First International Symposium on Geo-information for Disaster Management, Delft, The Netherlands, March 21–23, Springer Verlag, 2005.
- Okabe, A., Boots, B., Sugihara, K.: Spatial Tessellations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams. John Wiley & Sons, 1992.
- Vretanos, P.A.: Web Feature Service Implementation Specification Version 1.1.0, OGC Doc. No. 04-094, 2005.
- VRML97, Information technology – Computer graphics and image processing – The Virtual Reality Modeling Language (VRML) – Part 1: Functional specification and UTF-8 encoding. Part 1 of ISO/IEC Standard 14772-1:1997.
- web 3D, Information technology – Computer graphics and image processing – Extensible 3D (X3D). ISO/IEC FDIS 19775:200x. <http://www.web3d.org/x3d/specifications/ISO-IEC-19775-IS-X3DAbstractSpecification/> 2004.

**Anschrift der Autoren**

Dr. Gerhard Gröger | Dipl.-Ing. Dirk Dörschlag | Dipl.-Geogr. Marc-Oliver Löwner  
 Institut für Kartographie und Geoinformation, Universität Bonn  
 Meckenheimer Allee 172, 53115 Bonn  
[groeger@ikg.uni-bonn.de](mailto:groeger@ikg.uni-bonn.de) | [doerschlag@ikg.uni-bonn.de](mailto:doerschlag@ikg.uni-bonn.de) | [loewner@ikg.uni-bonn.de](mailto:loewner@ikg.uni-bonn.de)

Dr. Joachim Benner | Dr. Klaus Leinemann  
 Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Angewandte Informatik  
 Postfach 3640, 76021 Karlsruhe  
[benner@iai.fzk.de](mailto:benner@iai.fzk.de) | [klaus.leinemann@iai.fzk.de](mailto:klaus.leinemann@iai.fzk.de)

Dipl.-Geol. Rüdiger Drees  
 Geo-Services & GI-Systems, T-Mobile Deutschland GmbH  
 Landgrabenweg 151, 53184 Bonn  
[ruediger.drees@t-mobile.de](mailto:ruediger.drees@t-mobile.de)

Dipl.-Ing. Ulrich Gruber  
 Katasteramt des Kreises Recklinghausen, Kreisverwaltung Recklinghausen  
 Kurt-Schumacher-Allee 1, 45655 Recklinghausen  
[ulrich.gruber@kreis-recklinghausen.de](mailto:ulrich.gruber@kreis-recklinghausen.de)