

Zur Konsistenz bei der Visualisierung multiskaliger 3D-Stadtmodelle

(mit 12 Bildern)

Von Gerhard Gröger, Thomas H. Kolbe und Lutz Plümer, Bonn

ZUSAMMENFASSUNG: Bei der Realisierung von 3D-Stadtmodellen werden häufig mehrere Detaillierungsgrade unterschieden, was wesentlich durch die verschiedenen Datenerfassungsmethoden und erreichbaren Genauigkeiten bzw. Auflösungen bedingt ist. Für eine effiziente Visualisierung werden für betrachternaher Standorte hochaufgelöste Repräsentationen verwendet, während für entferntere bzw. im Bildhintergrund befindliche Objekte auch gröbere Instanzen ausreichen. Dabei muss allerdings sichergestellt werden, dass innerhalb einer Darstellung nicht gleichzeitig mehrere Repräsentationen des selben Objekts abgebildet werden. Dieser Beitrag stellt dazu ein Konzept für die konsistente Modellierung und Verwaltung von 3D-Stadtmodellen vor, das auf der Verwendung internationaler Standards der ISO und des OpenGIS Consortiums basiert. Das Modell ist in der Lage, sowohl einfache hierarchische als auch komplexe heterarchische Beziehungen zwischen den Repräsentationen in den einzelnen Detaillierungsgraden zu berücksichtigen.

ABSTRACT: Most 3d city models consist of multiple representations concerning geometric and semantic resolution and accuracy. In order to allow efficient visualization, highly detailed representations are selected in the vicinity of the observer's location, while coarser models are sufficient for remote objects. For this selection it has to be ensured, that no object is depicted more than once wrt. to its different representations. In this paper we propose a new concept for the consistent modeling and management of 3d city models based on international standards of the ISO and the OpenGIS Consortium. The model is capable of handling simple hierarchical as well as complex heterarchical relations between the representations in the different levels of detail.

1. Einleitung

Private Unternehmen und öffentliche Einrichtungen haben in den vergangenen Jahren große Anstrengungen unternommen, dreidimensionale Modelle für Städte oder einzelne Stadtgebiete zu erfassen. Die Motive waren und sind vielfältig. Die Visualisierung städtischer Szenen, die Darstellung von Planungsvorhaben aus der Fußgängerperspektive und die Integration in vorhandene, gewachsene Siedlungsstrukturen gehört zu den faszinierendsten Anwendungen dreidimensionaler Stadtmodelle. Visualisierung ist aber nicht die einzige Nutzung. Eine große Rolle spielte gerade in den Pionierjahren der dreidimensionalen Gebäudeerfassung die Funknetzplanung, wo zum ersten Mal in großen privaten Unternehmen die Erfahrung gemacht wurde, dass die dreidimensionale Erfassung städtischer Gebäude in großem Maßstab zwar mit erheblichen Anstrengungen verbunden ist, diese Kosten aber durch Einsparungen bei der Installation, Wartung und Instandsetzung des Netzes mehrfach kompensiert werden.

3D-Stadtmodelle werden heute in der Regel in proprietären Systemen erfasst und vorgehalten. Die Datenstrukturen sind bestimmt durch vorhandene Werkzeuge und die Anwendungen, die die Erfassung motiviert und finanziert haben. Inzwischen wird aber deutlich, dass 3D-Stadtmodelle multifunktional sind und auch für andere Zwecke verwendet werden können als nur die ursprünglich intendierten. Es stellt sich die Frage, wie die hohen Investitionen, die in diesen Daten enthalten sind, langfristig gesichert werden können. Dies wirft die Frage nach der Integrität und der Interoperabilität der Daten auf.

Ein zukunftsgerichtetes, auf Nachhaltigkeit angelegtes Datenmodell muss der Möglichkeit Rechnung tragen, dass dreidimensionale Gebäude- und Geländedaten in unterschiedlichen Detaillierungsgraden (Levels of Detail) vorliegen, die aus verschiedenen, voneinander unabhängigen Erfassungen hervorgehen. Ein Objekt kann in mehreren Detailstufen auf verschiedene Weise repräsentiert sein; daraus resultiert ein gewisses Maß an Redundanz, die die Quelle für Inkonsistenzen und Widersprüche bei Visualisierungen oder Auswertungen sein kann. Hieraus erwächst die Anforderung, dass die einzelnen Detaillierungsebenen nicht nur in sich, sondern auch untereinander konsistent sein müssen. Dies kann durch die Formulierung und Einhaltung strikter formaler Regeln geschehen, die traditionell im Kontext von Datenbanken zur Sicherung der Konsistenz bei Vorliegen von Redundanz eingesetzt werden. Die Diskussion von Lösungsmöglichkeiten für diese Probleme auf Basis eines objektorientierten Ansatzes ist Anliegen dieses Artikels. Er gliedert sich wie folgt: Der folgende Abschnitt diskutiert die Probleme der Visualisierung dreidimensionaler Stadtmodelle im Hinblick auf das Vorhandensein mehrerer Detaillierungsgrade (Levels of Detail, LODs). Er diskutiert zunächst vorhandene Ansätze

und zeigt Konsistenzprobleme beim Vorliegen verschiedener LODs auf. Der dritte Abschnitt stellt ein Modell für die geometrisch-topologische Repräsentation von 3D-Stadtmodellen vor. Der vierte Abschnitt erläutert die vielschichtigen Beziehungen zwischen den verschiedenen Auflösungsstufen und zeigt, wie diese konsistent visualisiert werden können. Eine kurze Zusammenfassung und ein Blick auf offene Fragen schließen den Beitrag ab.

2. Visualisierung von 3D-Stadtmodellen gemischter Level-of-Details

2.1 Probleme bei der mehrskaligen Visualisierung

Die Vorhaltung mehrerer Repräsentationen desselben Geobjekts in verschiedenen Detaillierungsgraden kann entscheidend zur Steigerung der Effizienz bei der Visualisierung von 3D-Stadtmodellen beitragen. Dabei werden für betrachternahere Standorte hochaufgelöste Repräsentationen angezeigt, während für weiter entfernte Objekte mit wachsender Distanz die Repräsentationen niedrigerer Detaillierungsgrade verwendet werden. Durch diese Maßnahme wird die Anzahl der insgesamt in einer Szene darzustellenden Polygone dramatisch reduziert und somit z. B. bei der interaktiven 3D-Navigation eine höhere Bildaufbauquote erzielt (vgl. Klein, 1998; Schilling und Zipf, 2003). Dabei muss jedoch sichergestellt werden, dass ein Objekt nicht mehrfach berücksichtigt und dargestellt wird. Als Beispiel zeigt Bild 4c) die Visualisierung eines Gebäudes, bei der zwei Repräsentationen – ein niedrig aufgelöstes Klötzchenmodell (Bild 4a) und ein detailliertes Architekturmodell (Bild 4b) zugleich dargestellt werden. Das Ergebnis ist die unerwünschte Mehrfachrepräsentation und die Durchdringung beider Objekte. Solche Situationen müssen durch eine geeignete, konsistente Modellierung zuverlässig ausgeschlossen werden.

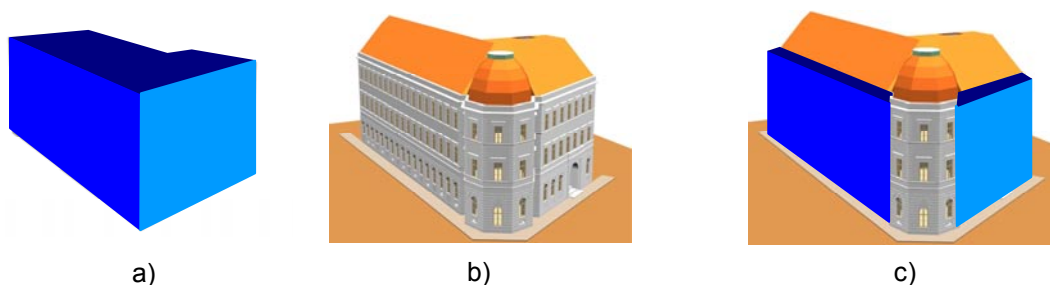


Bild 1 – Fehler durch Mehrfachrepräsentation bei einer Visualisierung. Die gleichzeitige Darstellung der Repräsentation als Klötzchenmodell (a) und als detailliertes Architekturmodell (b) desselben Gebäudes führt zu einer inkonsistenten Visualisierung (c), da sich beide Repräsentationen durchdringen.

Erschwert wird die Modellierung der Mehrfachrepräsentation dadurch, dass die Relationen zwischen den einzelnen Detaillierungsstufen sehr vielschichtig sein können. Die in Bild 1 dargestellte Situation zeigt nur den einfachsten Fall, bei dem das betreffende Geobjekt – das Gebäude – in jeder Detaillierungsstufe eine eindeutige, einzelne Repräsentation hat, die sich nur auf das Objekt bezieht. Oft ist ein Objekt, das in einer detaillierten Stufe eine eigenständige Repräsentation hat, in einer gröberen Stufe in einem Aggregat – z. B. einem Baublock – aufgegangen und nicht mehr als individuelles Objekt beobachtbar. Es ist hier nicht offensichtlich, wie die Mehrfachrepräsentation eines solchen Objekts bei Visualisierungen verhindert werden kann.

Im eben geschilderten Fall besteht eine hierarchische Beziehung zwischen zwei Detaillierungsgraden. Zusätzliche Probleme bei der Modellierung der Mehrfachrepräsentation treten jedoch auf, wenn aufgrund heterogener Datenerfassungen solche Hierarchien nicht zwischen allen Stufen vorliegen. In Abschnitt 4 wird gezeigt, wie alle diese Fälle durch eine konsistente Modellierung behandelt und eine Visualisierung ohne Mehrfachrepräsentation von Objekten zuverlässig und effizient gewährleistet werden kann.

2.2 Verwandte Arbeiten

Level-of-Details werden in Bezug auf 3D-Stadtmodelle sowohl im Bereich der Computergrafik als auch in dem Forschungsgebiet der Geoinformationssysteme bereits seit vielen Jahren untersucht. Dabei lassen sich zwei wesentliche Herangehensweisen erkennen:

1. Wenn davon ausgegangen werden kann, dass die 3D-Geobjekte immer in der höchsten Auflösung vorliegen, können Verfahren zur automatischen Simplifizierung eingesetzt werden. Diese

leiten aus Objekten höherer Detailgrade vereinfachte Repräsentationen ab. Während in der Computergrafik dazu meistens ausschließlich auf die geometrischen Eigenschaften der Objekte geachtet wird (Klein, 1998; Forberg und Mayer, 2002), berücksichtigen Ansätze der (kartographischen) Generalisierung im GIS-Bereich auch thematische und strukturelle Eigenschaften der Geoobjekte (de Cambray, 1993; Coors, 2001).

2. Als Basis für eine semantische Differenzierung unterschiedlicher Level-of-Details wird in vielen Arbeiten die explizite Definition und Nutzung konkreter Level-of-Details für die Geoobjekte in 3D-Stadtmodellen vorgeschlagen (Coors und Flick, 1998; Köninger und Bartel, 1998; Schilcher et al. 1999; Gaiani et al., 2002; Cieslik, 2003).

Die meisten Arbeiten, in denen 3D-Stadtmodelle in diskrete Level-of-Details konkret differenziert werden, schlagen eine Klassifizierung in die drei LoD-Stufen 1-3 vor (Köninger und Bartel, 1998; Schilcher et al. 1999; Cieslik, 2003). Die Aufteilung ist weitgehend durch die Möglichkeiten der verschiedenen Erfassungsmethoden bzw. Konstruktionsstrategien motiviert. Obwohl die LoDs dabei qualitativ und quantitativ nur grob umrissen werden, lassen sich zu den drei Stufen folgende gemeinsame Festlegungen identifizieren:

- LoD 1 steht für einfache Klötzchenmodelle, in denen weder Fassaden- noch Dachstrukturen ausmodelliert sind. Die Modelle sind fast immer untexturiert. Die 3D-Geometrie wird typischerweise durch die Extrusion von 2D-Gebäudegrundrissen automatisch abgeleitet, weshalb diese prismatischen Objekte auch keine Dachstruktur besitzen (vgl. Schilcher et al, 1999).
- LoD 2 steht für einfache 3D-Gebäude mit realistischen Dachformen und texturierten Flächen, jedoch ohne Modellierungsdetails in Bezug auf An- und Aufbauten wie z. B. Treppen, Balkone oder Gauben. Im Gegensatz zu LoD 1 sind in LoD 2-Modellen oftmals auch Straßenmöbel und Vegetationsobjekte enthalten. LoD 2-Modelle werden typischerweise durch eine photogrammetrische Auswertung, z.T. mit speziellen Gebäudeerfassungswerkzeugen (siehe Gülch und Müller, 2001; Grün und Wang, 2001), oder durch eine automatisierte Ableitung der Dachstrukturen aus LoD 1-Modellen in Verbindung mit Laserscanner-Messungen erfasst (vgl. Brenner et al., 2001).
- LoD 3-Modelle besitzen eine fein ausdifferenzierte Geometriemodellierung der Objektflächen. Sie sind texturiert oder sogar mit Materialien attribuiert. Solche Modelle sind bislang jedoch eher selten und werden aus einem 3D-Architekturmodell hergeleitet. Die automatisierte Erfassung hochdetaillierter Fassaden bestehender Gebäude ist aktueller Forschungsgegenstand und bislang nicht effektiv gelöst (siehe Früh und Zakhor, 2003).

In der 2002 gegründeten „Special Interest Group 3D“ (SIG 3D) der Initiative Geodateninfrastruktur NRW wird vorgeschlagen, darüber hinaus noch einen LoD 0 für die Repräsentation großräumiger Regionalmodelle sowie einen LoD 4 für die Modellierung von Innenräumen vorzusehen (Kolbe, 2003; Gröger und Kolbe, 2003).

3. Geometrisch-topologische Modellierung

Den Ausgangspunkt für die Repräsentation von 3D-Stadtmodellen, in denen verschiedene Level-of-Details zusammengeführt werden sollen, bildet eine zweischichtige Modellierung aus Basis- und Anwendungsmodell. Das Basismodell beinhaltet die Konzepte für die Repräsentation der räumlichen Eigenschaften der 3D-Geoobjekte. Es stellt eine universelle Grundlage für verschiedene anwendungs-

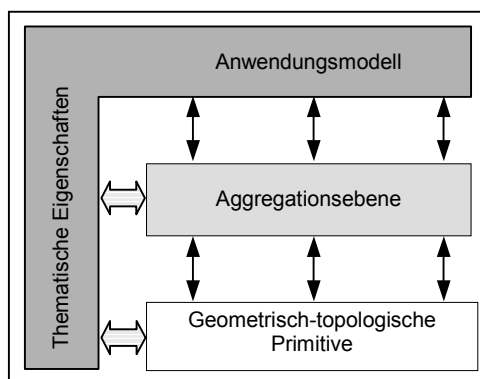


Bild 2 – Differenzierung des 3D-Modells in Basis- und Anwendungsmodell

spezifische thematische Modellierungen dar und ist deshalb in verschiedenen Kontexten wiederverwendbar. Diese Aufteilung erfolgt in Anlehnung an die Modellierung von ALKIS, dem neuen bundesweiten Standard der Arbeitsgemeinschaft der deutschen Vermessungsverwaltungen (AdV) für die Repräsentation des (2D-)Katasters (siehe Seifert, 2002). Abbildung 2 zeigt den schematischen Aufbau der Modellierung, wobei das Basismodell noch in die Ebene der geometrisch-topologischen Primitive und die Aggregationsebene untergliedert ist. Das Anwendungsmodell definiert die semantische Struktur der Geoobjekte und damit auch ihre thematischen Eigenschaften. Mit den beiden horizontal dargestellten Beziehungen vom Anwendungsmodell sowohl zur Aggregationsebene als auch der Primitivebene soll deutlich gemacht werden,

dass es analog zur Bildung geometrischer Komplexe auch kohärente semantische Aggregate geben kann, und die thematischen und räumlichen Eigenschaften dabei auf mehreren Ebenen miteinander assoziiert sein können.

Die unterste Ebene des Basismodells bilden 0-, 1-, 2- und 3-dimensionale Primitive. Primitive höherer Dimensionen setzen sich dabei ausschließlich aus Primitiven der jeweils darunter liegenden Dimension zusammen. Dadurch, dass nur Punktobjekte explizite Koordinaten besitzen, handelt es sich bei den höheren Dimensionen um implizite Geometrierepräsentationen. Im Gegensatz dazu sind die topologischen Zusammenhänge explizit repräsentiert. Diese Form der Modellierung geht zurück auf Molenaar (Molenaar, 1992) und wurde seitdem in zahlreichen Kontexten untersucht und angewendet (Zlatanova, 2000; Oosterom et al., 2002; Pfund 2002; Kolbe und Gröger, 2003; Gröger et al. 2004). Sie realisiert die Beschreibung von Volumina durch die Menge der sie begrenzenden Oberflächen, was im CAD-Bereich und in der Computergrafik als *Boundary Representation* (B-Rep) bezeichnet wird (siehe Foley et al., 1995). Die B-Rep-Modellierung von 3D-Objekten findet auch in dem ISO-Standard 19107 Anwendung (Herring, 2001), der wiederum die Grundlage für das Geometrie- und Topologie-Modell der Geography Markup Language GML3 des OpenGIS Consortiums darstellt (Cox et al., 2003). Dadurch ist die Abbildbarkeit des vorgestellten Modells auf internationale Standards zur Repräsentation, Speicherung und Übertragung von Geodaten sichergestellt.

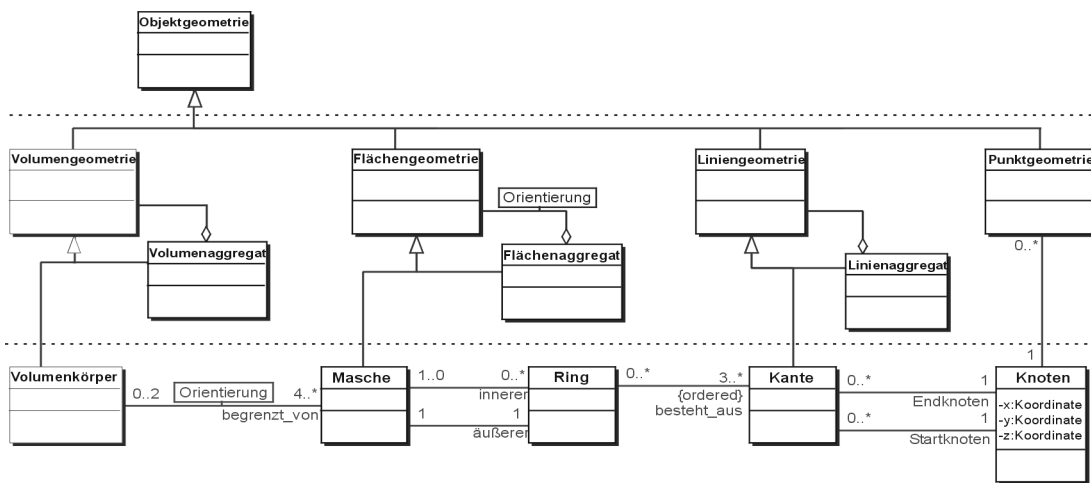


Bild 3 – Geometrisch-topologisches Basismodell, bestehend aus 0-3 dimensionalen Primitiven auf der untersten Ebene und ihren rekursiven Aggregationen auf der Aggregationsebene.

Abbildung 3 zeigt das entsprechende Datenmodell in UML-Notation (vgl. Booch et al., 1997). Im Unterschied zu geometrisch-topologischen 3D-Modellierungen, die an anderen Stellen vorgeschlagen wurden, befindet sich über der Primitivebene ergänzend noch eine Aggregationsebene, die eine rekursive Aggregation von Linien-, Flächen- und Volumenobjekten erlaubt. Damit lassen sich beispielsweise Dekompositionen komplexer Gebäudegeometrien abbilden, bei denen sich ein Gebäude z.B. aus dem Haus und einer Garage zusammensetzt, wobei ersteres noch in Haupt- und Nebentrakt zerlegt sein könnte.

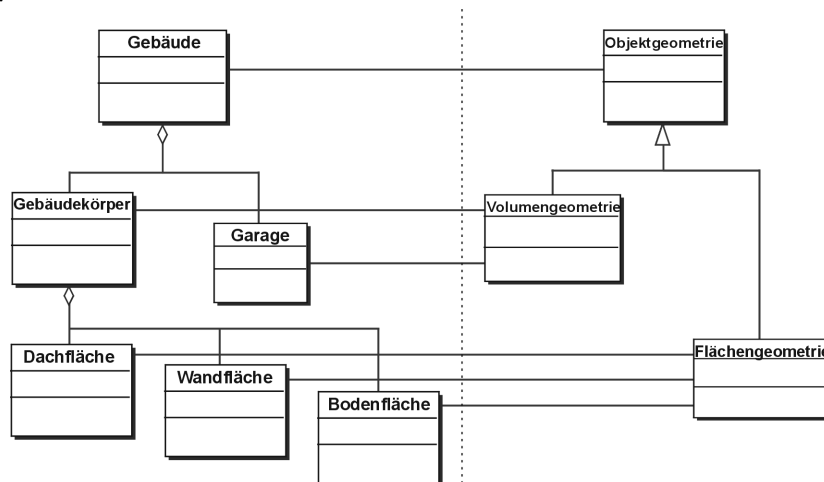


Bild 4 – Beispiel für ein Anwendungsmodell „Gebäude“ (links) mit kohärenter semantischer und räumlicher Aggregation

Das Anwendungsmodell bildet die thematischen Eigenschaften und Strukturen der für eine Anwendung relevanten 3D-Geoobjekte ab. Der Raumbezug wird dabei durch Assoziationen zu den entsprechenden Geometrieklassen des Basismodells hergestellt. Dies entspricht dem Konzept des „Features“ in den Spezifikationen des OpenGIS Consortium, das für eine Abstraktion eines Realweltobjektes bzw. -phänomens steht (OpenGIS Consortium, 1999). So kann z. B. für eine Gebäudegeometrie mittels einer Assoziation zu der Klasse Volumengeometrie eine B-Rep-Modellierung spezifiziert werden. Abbildung 4 zeigt beispielhaft die Modellierung des Konzepts „Gebäude“, das thematisch in Garage und Gebäudekörper sowie letzteres wiederum in Dach-, Wand- und Bodenfläche zerlegt ist. Der Raumbezug der typisierten Flächen wird durch die jeweiligen Assoziationen zur Klasse Flächengeometrie ausgedrückt. Um die Konsistenz zwischen den verschiedenen Aggregationsebenen zu wahren, muss es sich bei den referenzierten Flächen einer Gebäudeinstanz um die identischen Flächen handeln, die auch zur Bildung der Volumengeometrie des übergeordneten Gebäudekörpers verwendet werden.

Weitere Details zu dem vorgestellten Modell werden an anderen Stellen diskutiert (Gröger und Kolbe, 2003; Kolbe, 2003; Kolbe und Gröger, 2003; Gröger et al. 2004). Die Herstellung und Wahrung der Konsistenz von Geometrie und Topologie wird hingegen in (Plümer und Gröger, 1996; Plümer und Gröger, 1997; Gröger, 2000) untersucht.

4. Konsistente multiskalige Visualisierung

Die in Abschnitt 2.1 aufgeworfenen Probleme bei der Visualisierung, die aufgrund der Mehrfachrepräsentation von Objekten entstehen, und die sich durch die komplexe Beziehung zwischen Objekten in verschiedenen Detailebenen verschärfen, werden im Folgenden auf der Modellierungsebene gelöst. Hinsichtlich der Art der Beziehung zwischen den einzelnen Repräsentationen eines Objekts in verschiedenen Detaillierungsgraden lassen sich drei Fälle unterscheiden:

1. Ein Objekt hat in jedem LoD eine eigenständige Repräsentation.
2. Die Relation zwischen den Repräsentationen in den einzelnen LoD ist hierarchisch, d.h. eine Repräsentation in einem LoD ist Teil genau einer Repräsentation in dem nächst niedrigen LoD.
3. Die Relation zwischen den Repräsentationen in den einzelnen LoD ist nur partiell hierarchisch, d.h. es gibt nicht zwischen allen LoD-Stufen eine hierarchische Beziehung zwischen den Repräsentationen.

Diese drei Fälle werden im Folgenden diskutiert, illustriert und es wird gezeigt, wie eine konsistente Modellierung Fehler durch Mehrfachrepräsentation desselben Objekts zuverlässig und effizient vermeidet.

4.1 Erster Fall: Objekte mit eigenständiger Repräsentation in jedem LoD

Im einfachsten Fall, der hinsichtlich der Relation zwischen Repräsentationen in verschiedenen LoD auftreten kann, ist einem Geoobjekt auf der geometrischen Ebene in jedem LoD eine eigenständige Repräsentation, z.B. in Form einer Volumengeometrie, zugeordnet. Hinsichtlich der Struktur der thematischen Ebene lassen sich hier zwei Unterfälle unterscheiden: zum einen wird ein Objekt in allen LoD durch dasselbe thematische Objekt mit denselben Attributen repräsentiert, während im zweiten Fall jedem LoD auch ein eigenes thematisches Objekt zugeordnet ist, weil z. B. für Gebäude in einem feineren LoD eine reichhaltigere Auswahl an Klassen zur feineren Differenzierung zur Verfügung steht, oder weil Gebäude in einem feineren LoD mehr Attribute haben.

Das UML-Diagramm zur Modellierung des ersten Unterfalles ist am Beispiel der thematischen Klasse *Gebäude* in Bild 5 dargestellt. Bild a) zeigt das Klassendiagramm, während in Bild b) ein zugehöriges Instanzendiagramm skizziert ist. Die Klasse *Gebäude* hat für jeden LoD eine Assoziation zu der Volumengeometrie, die es in dem entsprechenden LoD repräsentiert. Die drei Assoziationen haben eine spezielle Semantik, da sie ein thematisches Objekt mit der Geometrie in dem entsprechenden LoD verbinden. Der Namen derartiger Assoziationen ist nicht frei wählbar, sondern qualifiziert: er wird nach dem Schema *LoDX-Geometrie* gebildet, wobei die ganze Zahl *X* die Detaillierungsstufe, die in der Regel zwischen 0 und 4 liegt, angibt.

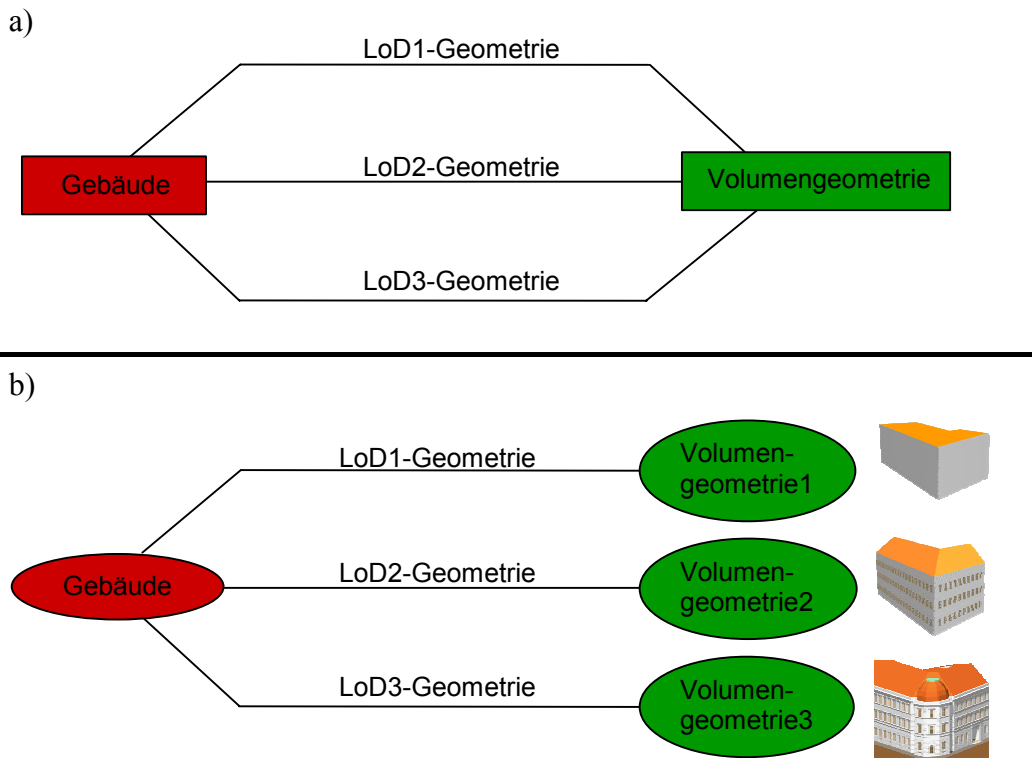


Bild 5 – UML-Klassendiagramm für Gebäude, die in jedem LoD als eigenständiges Objekt repräsentiert sind, und die in jedem LoD durch dasselbe thematische Objekt repräsentiert werden (a), und ein zugehöriges Instanzendiagramm (b).

Diese qualifizierte Assoziation ist Voraussetzung zur Definition einer Konsistenzbedingung, die sicherstellt, dass bei einer Visualisierung kein Objekt mehrfach dargestellt wird. In dem ersten Unterfall ist diese Konsistenzbedingung einfach; sie lautet wie folgt:

Konsistenzbedingung 1.1: Bei einer Visualisierung darf für jedes thematische Objekt nur genau eine über eine qualifizierte LoD-Geometrie-Assoziation verbundene Geometrie dargestellt werden.

Die Modellierung des zweiten Unterfalls, bei dem auch auf thematischer Ebene die Detailstufen differenziert sind, ist in Bild 6 dargestellt. In dem gezeigten Beispiel gibt es für jeden LoD eine eigene thematische Klasse zur Modellierung von Gebäuden, die über eine qualifizierte LoD-Geometrie-Assoziation mit der entsprechenden Volumengeometrie verknüpft ist. Die Zusammengehörigkeit der einzelnen thematischen Objekte wird dabei durch eine 1:1-Assoziation mit dem Namen *LoD-Assoziation* modelliert, bei der es sich wie bei LoD-Geometrie-Assoziation um eine qualifizierte Assoziation mit festem Namen und fester Semantik handelt.

Die Konsistenzbedingung zur Verhinderung von Mehrfachrepräsentationen bei der Visualisierung ist eine Erweiterung der Bedingung für den ersten Unterfall:

Konsistenzbedingung 1.2: Bei einer Visualisierung darf für jede Menge von thematischen Objekten, die durch eine qualifizierte LoD-Assoziation miteinander verbunden sind, nur für genau eines dieser Objekte die über eine qualifizierte LoD-Geometrie-Assoziation verbundene Geometrie dargestellt werden.

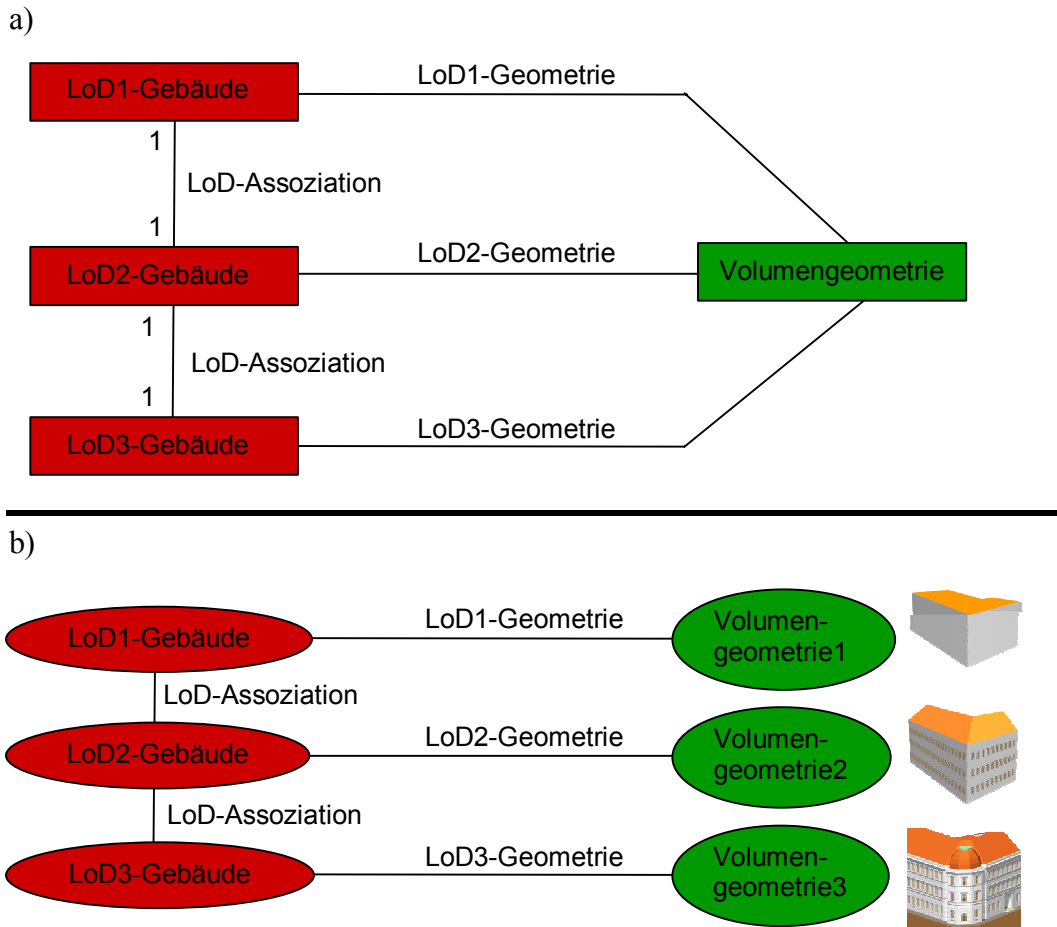


Bild 6 – UML-Klassendiagramm zur Modellierung von Gebäuden, die in jedem LoD als eigenständiges Objekt repräsentiert sind, die jedoch auf der thematischen Ebene differenziert durch verschiedene Klassen für jeden LoD repräsentiert werden (a). Bild b) zeigt ein zugehöriges Instanzendiagramm.

4.2 Zweiter Fall: hierarchische LoD-Relation zwischen allen Objekten

Im eben diskutierten ersten Fall hat jedes Geoobjekt eine eigenständige Repräsentation in jedem LoD. Oft sind solche Objekte jedoch auf gröberen Ebenen Teil eines Aggregats und nicht mehr als individuelles Objekt beobachtbar. Bild 7 zeigt als Beispiel die Draufsicht auf eine Szene, in der auf der feinsten Ebene Gebäude abgebildet sind, die auf der nächst höheren Ebene nur noch als Teil einer Straßenzeile beobachtbar sind. Auf der größten Ebene sind diese Straßenzeilen wiederum in einem Baublock aufgegangen. Diese hierarchische Struktur lässt sich durch einen Aggregationsbaum (Bild 7b) beschreiben, in dem die Beziehung zwischen einem Objekt und seinen Teilobjekten durch gerichtete Nachfolgerkanten repräsentiert wird. Es handelt sich bei der Struktur um einen Baum, da jedes Objekt Teil höchstens eines Aggregats ist und somit nur höchstens einen Vorgänger hat.

Die Modellierung der hierarchischen Aggregation in Form eines UML-Klassendiagramms zeigt Bild 8. Die Klassen *Gebäude*, *Straßenzeile* und *Baublock* haben jeweils eine geometrische Repräsentation in den entsprechenden Detaillierungsgraden und sind untereinander durch eine Aggregation – das entsprechende Symbol in UML ist die Raute – verbunden. Im Unterschied zu der Modellierung im ersten Fall – zweiter Unterfall handelt es sich hier jedoch nicht um eine 1:1-Beziehung, sondern um eine 1:n-Beziehung. Analog zu diesem Fall ist die Aggregation qualifiziert mit dem festen Namen *LoD-Aggregation*. Die Semantik dieser Relation ist, dass es sich um eine hierarchische Bestandteilsrelation zwischen Objekten in verschiedenen, benachbarten Detaillierungsgraden handelt.

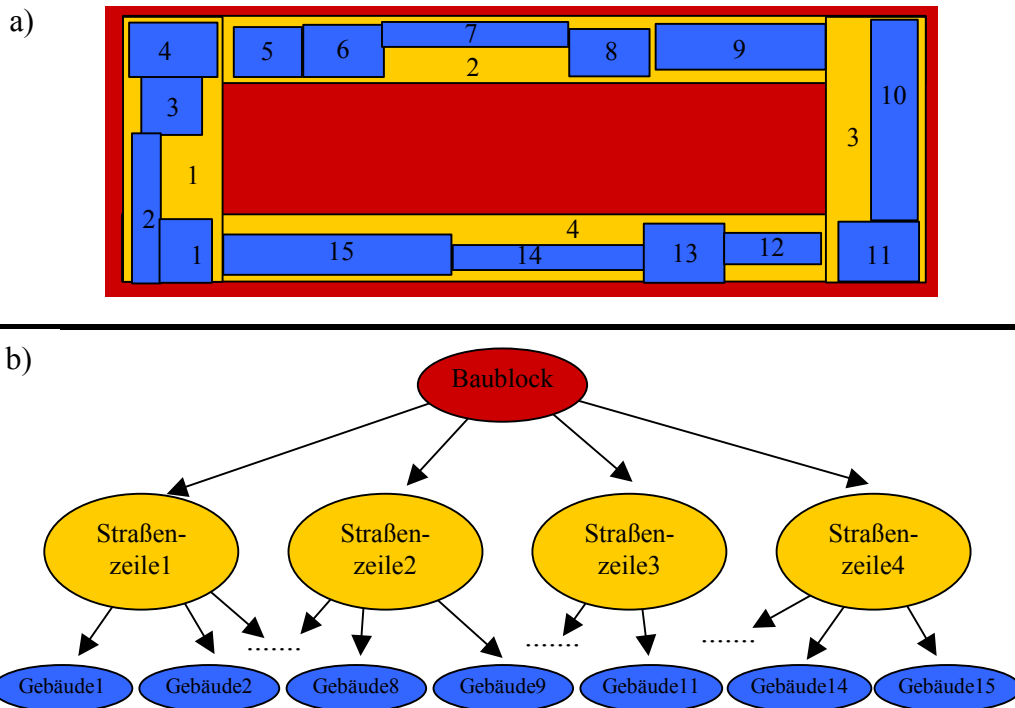


Bild 7 – Beispiel für eine hierarchische Aggregationsbeziehung zwischen verschiedenen Detaillierungsstufen. In der Szene in Bild a) besteht der Baublock (rot) aus vier Straßenzeilen (gelb), die jeweils aus Gebäuden (blau) bestehen. Bild b) skizziert die Aggregationsstruktur.

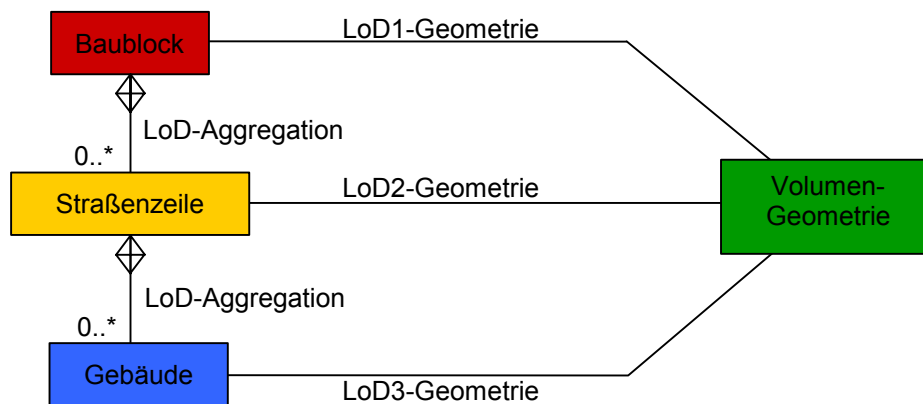


Bild 8 – UML-Klassendiagramm für den hierarchischen Fall. Die Aggregationshierarchie zwischen den thematischen Objekten in verschiedenen Detaillierungsstufen ist durch qualifizierte Assoziationen mit Namen *LoD-Aggregation* modelliert (Symbol: Raute mit Kreuz). Ebenso erfolgt die Zuordnung der Geometrie-Klassen zu den thematischen Objekten durch die qualifizierte Assoziation *LoDX-Geometrie*, wobei die ganze Zahl *X* die LoD-Stufe angibt.

Unter Verwendung dieser LoD-Aggregation und deren Semantik kann nun die Konsistenzbedingung angegeben werden, die im Fall der hierarchischen Aggregation die Mehrfachrepräsentation desselben Objekts bzw. Teil des Raumes bei einer Visualisierung verhindert. Sie lautet:

Konsistenzbedingung 2: Zwei Repräsentationen R_1 und R_2 dürfen in einer Visualisierung zusammen enthalten sein, wenn R_1 kein Nachfolger von R_2 und wenn R_2 kein Nachfolger von R_1 im Aggregationsbaum ist.

Der Begriff des *Nachfolgers* ist dabei rekursiv definiert: ein Knoten K_1 ist Nachfolger eines Knotens K_2 im Baum, wenn es einem Pfad von K_1 hinab zu K_2 im Baum gibt. Die Richtung im Baum geht dabei von der größeren zum feineren Detaillierungsgrad.

Zur Illustration der Konsistenzbedingung 2 wird die Szene in Bild 7 betrachtet. Wenn der Baublock visualisiert wird, darf kein anderes Objekt mit dargestellt werden, da alle diese Objekte Nachfolger des *Baublock*-Knotens sind. Ebenso dürfen *Straßenzeile4* und *Gebäude14* nicht zusammen visualisiert werden, da der *Gebäude14*-Knoten Nachfolger des *Straßenzeile4*-Knotens ist. Demgegenüber dürfen *Straßenzeile1* und *Gebäude8 – Gebäude15* gemeinsam dargestellt werden, da weder der *Straßenzeile1*-Knoten Nachfolger der *Gebäude*-Knoten Nr. 8 – 14 ist noch umgekehrt diese *Gebäude*-Knoten Nachfolger des *Straßenzeile1*-Knotens sind. Ebenso dürfen alle vier Straßenzeilen dargestellt werden, da es unter Ihnen keine Nachfolger-Beziehung im Baum gibt.

4.3 Dritter Fall: nicht-hierarchische LoD-Relation zwischen Objekten

Da GIS-Daten sehr häufig voneinander unabhängig erfasst werden, kann es vorkommen, dass nicht zwischen allen Detaillierungsstufen eine hierarchische Beziehung beobachtbar ist. In der Szene in Bild 9 gibt es zwar eine hierarchische Bestandteilsbeziehung zwischen Gebäuden und Straßenzeilen einerseits und zwischen Gebäuden und Bezirken andererseits, nicht jedoch zwischen Bezirken und Straßenzeilen. Diese überlappen sich zwar gegenseitig, es gibt jedoch keine hierarchische Bestandteilsbeziehung, da z. B. ein Teil der *Straßenzeile1* im *Bezirk1* liegt, ein anderer Teil jedoch im benachbarten *Bezirk2*. Es handelt sich hier also um eine andere Art von Relation als im vorherigen Fall. Solch heterarchischen Beziehungen wie in Bild 9 lassen sich nicht durch Bäume beschreiben, da hier Knoten mehrere Vorgänger haben – wie z.B. der *Gebäude2*-Knoten, der als Vorgänger sowohl den *Straßenzeile1*- als auch den *Bezirk1*-Knoten hat. Solche Strukturen sind unter dem Begriff *gerichteter azyklischer Graph* (*directed acyclic graph*, abgekürzt *DAG*) bekannt (Cormen et al., 1990).

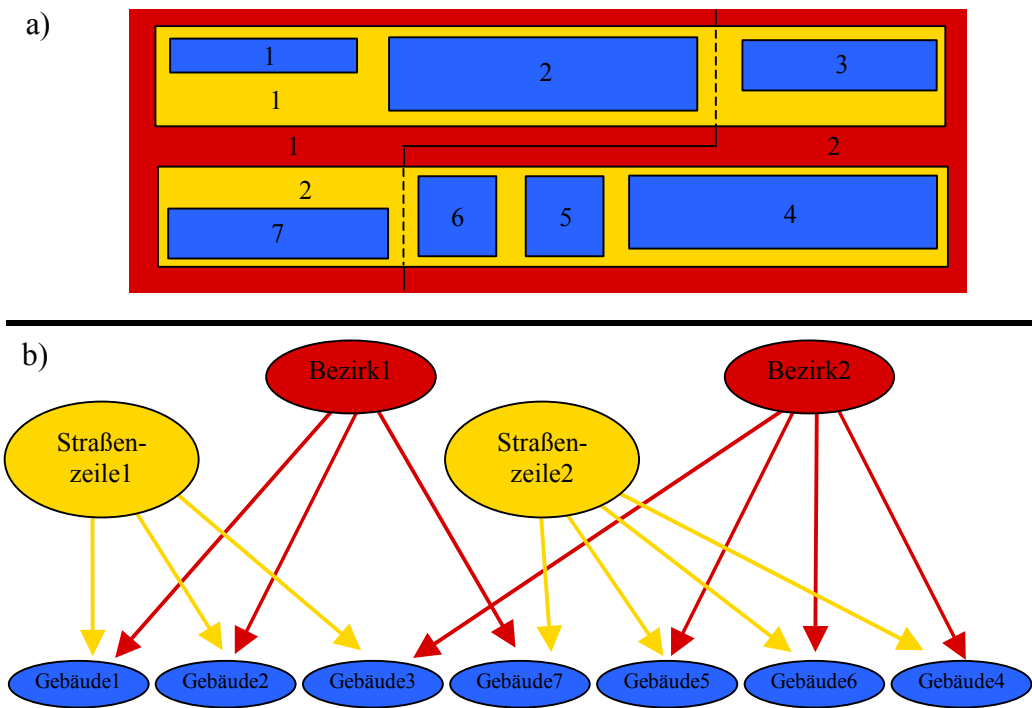


Bild 9 – Beispiel für eine nicht-hierarchische Beziehung zwischen verschiedenen Detaillierungsgraden. In der Szene in Bild a) bestehen Bezirke (rot) und Straßenzeilen (gelb) aus Gebäuden (blau), es gibt jedoch keine Hierarchie zwischen Bezirken und Straßenzeilen. Die Struktur der Objekte ist in dem gerichteten azyklischen Graphen (DAG) in b) skizziert.

Das UML-Klassendiagramm zur Modellierung der Szene in Bild 9 zeigt Bild 10. Im Gegensatz zu dem Diagramm für die hierarchische Aggregation (Bild 8) gibt es hier jedoch keine qualifizierte LoD-Aggregation zwischen allen Klassen benachbarter LoD, sondern zwischen Bezirken und Gebäuden und zwischen Straßenzeilen und Gebäuden. Die Semantik der qualifizierten Relation mit Namen LoD-Aggregation ist jedoch dieselbe wie im hierarchischen Fall.

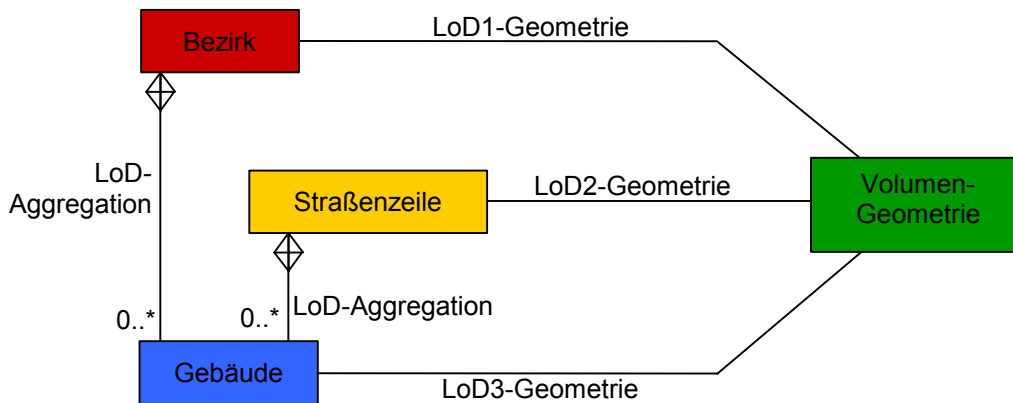


Bild 10 – UML-Klassendiagramm für den nicht-hierarchischen Fall. Die Aggregation zwischen Bezirken und Gebäuden bzw. zwischen Straßenzeilen und Gebäuden wird durch die qualifizierte Assoziation *LoD-Aggregation* (Symbol: Raute mit Kreuz) modelliert.

Die Konsistenz bei der Visualisierung einer nicht-hierarchischen Szene stellt die folgende Bedingung sicher, die diejenige für den hierarchischen Fall (Konsistenzbedingung 2) verallgemeinert:

Konsistenzbedingung 3: Zwei Repräsentationen R_1 und R_2 dürfen in einer Visualisierung zusammen enthalten sein, wenn R_1 und R_2 keinen gemeinsamen Nachfolger im DAG haben.

Der Begriff *gemeinsamer Nachfolger* wird hier so definiert, dass dieser auch in dem Fall existiert, wenn einer der beiden Knoten Nachfolger des anderen ist. Die Veranschaulichung dieser Konsistenzbedingung anhand der in Bild 9 gezeigten Szene ergibt z. B., dass die beiden Bezirke *Bezirk1* und *Bezirk2* gemeinsam visualisiert werden dürfen, da beide keinen gemeinsamen Nachfolger im DAG (Bild 9b) haben. Ebenso dürfen *Bezirk1* und *Gebäude2* sowie *Gebäude6* zusammen dargestellt werden, da es keine gemeinsamen Nachfolger der drei zugehörigen Knoten gibt. Die Visualisierung von *Bezirk2* und *Straßenzeile1* führt dagegen zu Inkonsistenzen, da die beiden entsprechenden Knoten einen gemeinsamen Nachfolger – den Knoten *Gebäude3* – haben. Ebenso dürfen *Bezirk2* und das *Gebäude6* nicht miteinander kombiniert werden, da beide mit dem Knoten für *Gebäude6* einen gemeinsamen Nachfolger haben.

Die Zusicherung, dass die hier formulierten Konsistenzbedingungen die mehrfache Darstellung desselben Objekts zuverlässig gewährleisten, ist an die Gültigkeit einer Annahme geknüpft. Diese besagt, dass die unterste, feinste Detaillierungsebene vollständig sein muss, d.h. dass dort jede Überlappung auf höheren Ebenen explizit repräsentiert ist. Bei allen bisher gezeigten Beispielen war diese Annahme erfüllt. Bild 11b) zeigt jedoch als Gegenbeispiel eine Struktur, in der die Überlappung zwischen *Bezirk1* und *Straßenzeile2* durch das Fehlen eines Gebäudes nicht repräsentiert ist. Die Konsistenzbedingung 3 verbietet die gemeinsame Visualisierung von *Bezirk1* und *Straßenzeile2* nicht, obwohl dieser Darstellung aufgrund der Überlappung fehlerhaft wäre.

Die Herstellung der Konsistenz bei einer unvollständigen detailliertesten Ebene ist jedoch durch die Einführung eines speziellen Knotens für jede nicht repräsentierte Überlappung auf höheren Ebenen einfach möglich. Die Struktur in Bild 11b) kann z. B. durch Hinzufügen eines gemeinsamen Nachfolgerknotens des *Bezirk1*- und des *Straßenzeile2*-Knotens konsistent vervollständigt werden.

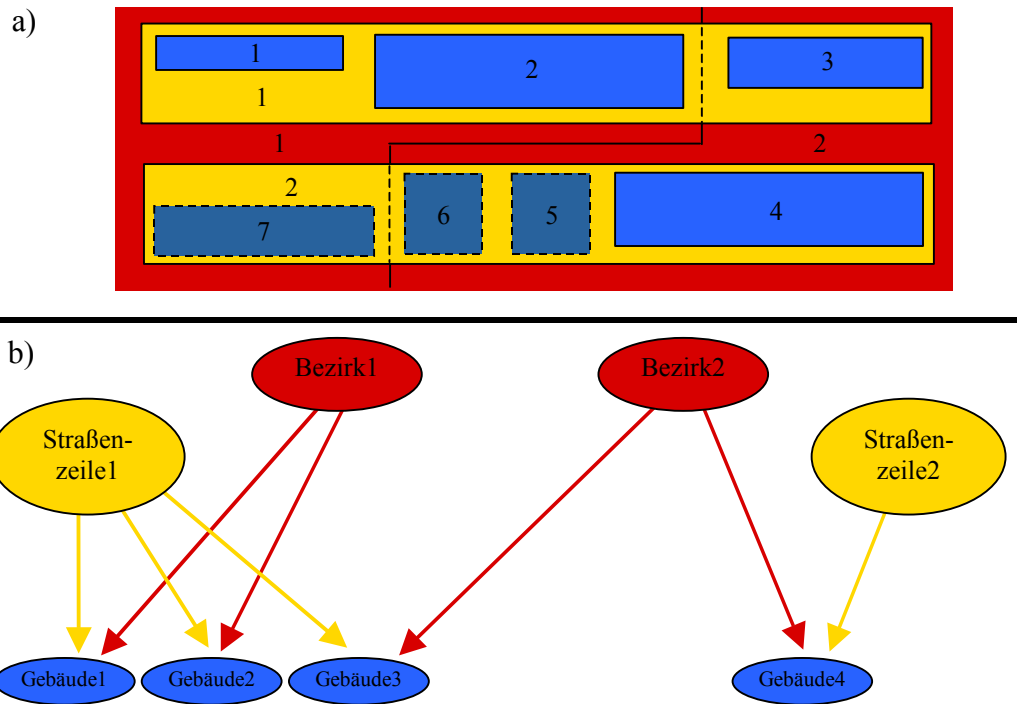


Bild 11 – Beispiel für eine Modellierung mit einer unvollständigen feinsten Detaillierungsebene. Drei Gebäude in der Szene (a) sind in dem Modell (b) nicht erfasst, sodass die Überlappung zwischen *Bezirk1* und *Straßenzeile2* nicht repräsentiert ist.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Artikel schlägt eine Repräsentation für 3D-Stadtmodelle vor, die auf internationalen Standards der ISO und des Open GIS Consortium beruht und so Interoperabilität zwischen verschiedenen Systemen sicherstellt. Der Fokus liegt auf der Behandlung der multiskaligen Visualisierung, die aus Gründen der Effizienz bei der Darstellung unabdingbar ist. Dabei ergibt sich das Problem der Vermeidung der Mehrfachdarstellung desselben Objekts bzw. desselben Teils des Raumes. Hinsichtlich der Art der Relation zwischen Objekten in verschiedenen Detaillierungsstufen können drei Fälle auftreten, die sich in ihrer Komplexität stark unterscheiden. Für jeden dieser Fälle wird eine Modellierung in der graphischen Modellierungssprache UML angegeben. Diese Sprache wird dabei um qualifizierte Assoziationen und entsprechende Symbole erweitert, die eine spezielle Semantik haben und es Werkzeugen ermöglichen, die Repräsentationen in den verschiedenen Detaillierungsgraden zu unterscheiden und entsprechend darzustellen. Auf Basis dieser qualifizierten Assoziationen werden effektiv und effizient überprüfbare Konsistenzbedingungen angegeben, die in jedem der drei Fälle die Mehrfachrepräsentation von Objekten zuverlässig verhindert.

Ein offenes Problem ist die Entwicklung von Verfahren, die die Objekte in den einzelnen LoD einander korrekt zuordnen und so die Aggregationsbäume bzw. gerichteten azyklischen Graphen aufbauen. Diese Aufgabe ist gerade im Kontext von Geodateninfrastrukturen, die durch verteilte Datenhaltung charakterisiert sind, besonders schwierig, da die Geodaten in den einzelnen Detaillierungsstufen typischerweise von verschiedenen Anbietern im Rahmen von Diensten bereitgestellt werden. Die Daten werden erst unmittelbar vor der Visualisierung zusammengeführt, sodass deren Integration und die Zuordnung der entsprechenden Repräsentationen in den LoD hier in einem äußerst zeitkritischen Bereich erfolgen müssen. Es bietet sich an, entsprechende Dienste zur Erledigung dieser Aufgabe zu konzipieren und in bestehende Dienstarchitekturen zu integrieren.

Ein weiteres bisher ungelöstes Problem stellt die Visualisierung unvollständig erfasster Detaillierungsstufen von 3D-Stadtmodellen dar. Die Szene in Bild 12 zeigt z.B. einen Baublock, der aus fünf Gebäuden G_1 bis G_5 besteht, von denen jedoch nur zwei – G_1 und G_3 – detailliert erfasst wurden. Während die Visualisierung der größten Stufe, des Baublocks, unkompliziert ist, ergibt sich bei der Darstellung der feinsten Stufe das Problem, dass nur die beiden erfassten Gebäude G_1 und G_3 dargestellt werden können, nicht jedoch die drei anderen. Diese sind nur als Teil des Baublocks repräsentiert.

tiert und können nur berücksichtigt werden, wenn auch dieser dargestellt wird. Dies führt jedoch zu der Mehrfachdarstellung der beiden Gebäude G_1 und G_3 , die ebenfalls Teil des Baublocks sind. In jedem Fall ergibt sich hier ein Fehler, entweder durch die fehlende Darstellung eines vorhandenen Geoobjekts oder durch die Mehrfachdarstellung eines Objekts. Lösungsansätze könnten in der geometrischen Anpassung des Baublocks, etwa durch Ausschneiden der beiden detailliert vorhandenen Gebäude G_1 und G_3 oder im Auffüllen der Lücken zwischen den Gebäuden liegen.

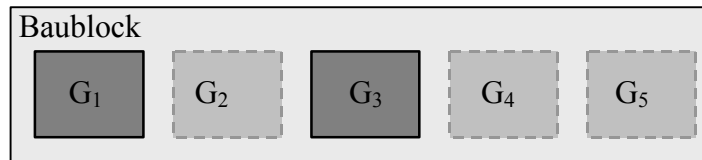


Bild 12 – Fehler durch unvollständig erfasste LoD. Im detaillierten LoD fehlen drei Gebäude (G_2 , G_4 und G_5), die Teil des Baublocks des größeren LoD sind. Bei der Visualisierung des detaillierten LoD fehlen entweder die drei Gebäude G_2 , G_4 und G_5 (obwohl sie als Teil des Baublocks repräsentiert sind) oder der Baublock wird mit dargestellt, was zu einer unerwünschten Mehrfachrepräsentation der Gebäude G_1 und G_3 führt.

Danksagung

Ein Teil der vorgestellten Konzepte stützt sich auf Ergebnisse einer Studie für die Stadt Wuppertal, an der neben den Autoren noch Prof. Wolfgang Förstner und Ansgar Brunn vom Institut für Photogrammetrie der Uni Bonn beteiligt waren. Wir danken den Mitgliedern der Arbeitsgruppe Modellierung der *Special Interest Group (SIG) 3D* der Initiative *Geodateninfrastruktur NRW (GDI NRW)*, insbesondere Hardo Müller und Rüdiger Drees für die Mitwirkung bei der Weiterentwicklung des Basismodells und der Konzepte zur Modellierung der Detaillierungsgrade. Ferner danken wir Ingo Petzold für konstruktive Diskussionen sowie Daniela Schulz für die Mithilfe bei der Erstellung von Abbildungen.

Literatur

- Booch, G., Rumbaugh, J., Jacobson, I., 1997: Unified Modeling Language User Guide. Addison-Wesley.
- Brenner, C., Haala, N., Fritsch, D., 2001. Towards fully automated 3D city model generation. In: Proc. 3rd International Workshop on Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images, Baltsavias, E. Grün, A., Van Gool, L. (eds.), Balkema Publishers, Rotterdam
- Cieslik, B., 2003: Hamburg in der dritten Dimension. Zeitschrift für das Vermessungswesen 4/2003
- Coors, V., 2001: Feature-preserving Simplification in Web-based 3D-GIS. In: Butz et al. (Eds.): Int. Symp. on Smart Graphics. Proceedings 2001. New York. ACM Press.
- Coors, V., Flick, S., 1998: Integrating Levels of Detail in a Web-based 3D-GIS, Proc. 6th ACM Symp. on Geographic Information Systems (ACM GIS 98), Washington D.C., USA.
- Cormen, T.H., Leiserson, C.E., Rivest, R.L., 1990: Introduction to Algorithms, McGraw-Hill.
- Cox, S., Daisy, P., Lake, R., Portele, C., Whiteside, A., 2003: OpenGIS Geography Markup Language (GML3), Implementation Specification Version 3.00, OGC Doc. No. 02-023r4.
- De Cambray, B., 1993: Three-Dimensional (3D) Modelling in a Geographical Database. In Proceedings of Auto-Carto'11: 11th International Conference on Computer Assisted Cartography, pages 338-347, Oct 1993
- Foley, J., van Dam, A., Feiner, S., Hughes, J., 1995: Computer Graphics: Principles and Practice. Addison Wesley, 2nd Ed.
- Früh, C., Zakhor, A., 2003: Constructing 3D City Models by Merging Ground-Based and Airborne Views. In: Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition CVPR 2003, Madison, USA, June 2003, p. II-562 - 69.
- Gaiani, M., Gamberini, E., Tonelli, G., 2002: A framework to use virtual worlds generated from real world 3D models as Work Tool for Architectural & Archaeological Restoration on the Web. In: International Journal of Design Computing, University of Sydney Library, Vol. 4, 2002.

- Gröger, G., 2000: Modellierung raumbezogener Objekte und Datenintegrität in GIS, Wichmann: Heidelberg.*
- Gröger, G., T. H. Kolbe, 2003. Interoperabilität in einer 3D-Geodateninfrastruktur. In Bernhard, Sliwinski, Senkler. Geodaten- und Geodienste-Infrastrukturen - von der Forschung zur praktischen Anwendung. Tagungsband der Münsteraner GI-Tage 2003. IfGI Prints 18, Uni Münster.*
- Gröger, G., T. H. Kolbe, L. Plümer, 2004: Mehrskalige, multifunktionale 3D-Stadt- und Regionalmodelle. Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG) 2/2004.*
- Grün, A., Wang, X., 2001: News from CyberCity-Modeler. In: Proc. 3rd International Workshop on Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images, Baltsavias, E. Grün, A., Van Gool, L. (eds.), Balkema Publishers, Rotterdam*
- Herring, J., 2001: The OpenGIS Abstract Specification, Topic 1: Feature Geometry (ISO 19107 Spatial Schema), Version 5. OGC Document Number 01-101.*
- Klein, R., 1998: Multiresolution representations for surfaces meshes based on the vertex decimation method. Computers and Graphics, Vol. 22, No. 1, pages 13-26*
- Kolbe, T. H., 2003: Interoperable Modelle, GeoBIT 5/2003.*
- Kolbe, T. H., Gröger, G., 2003: Towards Unified 3D-City-Models. In: Proc. of. ISPRS Commission IV Joint Workshop on Challenges in Geospatial Analysis, Integration and Visualization II, September 8 - 9, Stuttgart, Germany.*
- Köninger, A., Bartel, S., 1998: 3D-GIS for Urban Purposes, Geoinformatica, 2(1), March 1998.*
- Forberg, A., Mayer, H., 2002: Generalization of 3D Building Data Based on Scale-Spaces. Proceedings of the Symposium on Geospatial Theory, Processing, and Applications. Ottawa 2002. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (34) 4, 225-230*
- Gülch, E., Müller, H., 2001: New applications of semi- automatic building acquisition. In: Proc. 3rd International Workshop on Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images, Baltsavias, E. Grün, A., Van Gool, L. (eds.), Balkema Publishers, Rotterdam*
- Molenaar, M., 1992: A topology for 3D vector maps. ITC Journal 1992-1, The International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, The Netherlands.*
- Oosterom, P., Stoter, J., Quak, W., Zlatanova, S., 2002: The balance between geometry and topology. In Richardson, D., Oosterom, P. (eds.): Advances in Spatial Data Handling. Proceedings of 10th Int. Symp. SDH 2002, Springer, Berlin.*
- OpenGIS Consortium, 1999: The OpenGIS Abstract Specification, Topic 5: Features, Version 4. OGC Doc. No. 99-105r2.*
- Pfund, M., 2002: 3D GIS Architecture, GIM International, 2/2002*
- Plümer, L., Gröger, G., 1996: Nested Maps - a Formal, Provably Correct Object Model for Spatial Aggregates, Proceedings of the 4th ACM International Workshop on Advances in Geographic Information Systems, Rockville, Maryland, USA, ACM Press.*
- Plümer, L., Gröger, G., 1997: Achieving Integrity in Geographic Information Systems – Maps and Nested Maps. Geoinformatica 1:4.*
- Schilcher, M., Guo, Z., Klaus, M., Roschlaub, R., 1999: Aufbau von 3D-Stadtmodellen auf der Basis von 2D-GIS. Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung (ZPF), 67. Jg. 1999*
- Schilling, A., Zipf, A., 2003: Generation of VRML City Models for Focus Based Tour Animations. Integration, Modeling and Presentation of Heterogeneous Geo-Data Sources. In: Proceedings of the 8th Int. Symp. on Web 3D Technology Web3D 2003, March 2003 in Saint Malo, France*
- Seifert, M., 2002: On the Use of ISO standards in Cadastral Information Systems in Germany, FIG XXII International Congress, Washington DC, USA, April 2002*
- Zlatanova, S., 2000: 3D GIS for Urban Development. PhD Thesis, ITC Dissertation Series No. 69, The International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, The Netherlands.*