

Mehrskalige, multifunktionale 3D-Stadt- und Regionalmodelle

GERHARD GRÖGER, THOMAS H. KOLBE & LUTZ PLÜMER, Bonn

Keywords: 3D city models, 3D GIS, geometric-topological modeling, level of detail, multiscale

Zusammenfassung: Viele Kommunen haben in den letzten Jahren damit begonnen, dreidimensionale Stadtmodelle zur Unterstützung von Planungsprozessen aufzubauen. Da diese Modelle häufig in CAD- oder Visualisierungssystemen verwaltet werden, und diese nur stark eingeschränkte Modellierungsmöglichkeiten bieten, sind die Modelle oftmals ausschließlich zur Visualisierung geeignet.

Der Artikel stellt ein Konzept für multifunktionale 3D-Stadt- und Regionalmodelle vor, das einerseits einfach und verständlich darstellbar ist, andererseits mächtig genug ist, um die Basis für vielfältige thematische Anwendungen – insbesondere über die Visualisierung hinaus – bilden zu können. Ein Konzept zur konsistenten Verwaltung mehrerer Detaillierungsgrade ermöglicht zum einen die Behandlung des Problems inhomogener Datenverfügbarkeit und führt zum anderen auch zu einer Steigerung der Effizienz bei Analysen und Visualisierungen. Konsistenzbedingungen sichern dabei zu, dass kein Geobjekt mehrfach repräsentiert wird.

Summary: *Concept for multiscale, multifunctional 3D city and regional modeling.* An increasing number of municipalities decide nowadays to build up 3D city models. Since these models typically are implemented on top of CAD systems or visualization software offering only limited modeling capabilities, in most cases they are suitable for visualization purposes only.

In this paper, we propose a concept for multifunctional 3D city and regional modeling, which is on the one hand compact and understandable, and capable to represent manifold application specific city models on the other hand. We explicitly cope with the problem of multiscale representations. A special level of detail relation between features and their geometry ensures spatial consistency between 3D models at different scales.

1 Einleitung

Dreidimensionale Stadtmodelle gewinnen an Beliebtheit. Viele Kommunen haben in den vergangenen Jahren damit begonnen, dreidimensionale Stadtmodelle aufzubauen. Auch private Unternehmen erfassen dreidimensionale Gebäudedaten und versuchen, diese Geoinformationen anderen Nutzern zu verkaufen. Am bekanntesten sind die Mobilfunkbetreiber, die 3D-Stadtmodelle benötigen, um Funknetze zu planen und zu verwalten. Die Unternehmensleitungen ha-

ben die Erfahrung gemacht, dass die Ausgaben für die 3D-Datenerfassung und -verwaltung durch Kosteneinsparungen bei Installation, Wartung und Instandsetzung des Netzes mehrfach kompensiert werden. Der Verkauf dieser Daten kommt allerdings nur schleppend voran.

Kommunen bauen dreidimensionale Datenbestände aus unterschiedlichen Motiven und Fachanwendungen heraus auf. In dem einen Fall steht das Interesse an Gewinnung privater Investoren für Industrieansiedlungen und die Stadtentwicklung im Vorder-

grund. In einer anderen Kommune werden für die Ermittlung von Regenwasserabgaben präzise geometrische Daten über Dächer und Versiegelungsflächen benötigt. Mögliche Anwendungsfelder reichen vom Lärmschutz über die Bauplanung bis hin zum Facility Management. Erwähnt werden soll auch das Katastrophenmanagement (Hochwasser, Überschwemmung, Geiselnahme) wo dreidimensionale Geoinformation benötigt wird, um Entscheidungsträgern wirksames und zweckdienliches Handeln zu ermöglichen und Risiken abzuschätzen.

Katasterämter, Vermessungsverwaltungen und private Datenanbieter stehen vor dem Problem, wie die mit großem finanziellem Aufwand erhobenen Daten nachhaltig verwaltet und in eine Form gebracht werden können, die sie auch für neue, zunächst nicht intendierte Anwendungen brauchbar macht.

Dies ist das Problem der Interoperabilität und schafft Bedarf für national und international anerkannte Modelle, Standards und Normen. Diese Notwendigkeit ist im Bereich der zweidimensionalen Geodaten seit langem bekannt und zum Teil technisch gelöst. Die Standardisierungsarbeiten im Bereich des Open GIS Consortiums haben inzwischen beträchtliche Fortschritte gemacht, sie ermöglichen neue, innovative Anwendungen und Verknüpfungen. Im Bereich 3D bleibt noch vieles zu tun, und einige Besonderheiten verdienen besondere Beachtung.

3D-Stadtmodelle sollten bereits vom Ansatz her multifunktional und für den Einsatz in verschiedenen fachlichen Anwendungen geeignet sein. Auch wenn heute die explorative Nutzung durch den Anwender durch Visualisierung und Animation hervorragend unterstützt wird, sollte die Analyse, also die Nutzung der Daten für maschinelle Berechnungen für Aufgaben der Planung und Simulation nicht unberücksichtigt bleiben. Modelle müssen also generisch sein und verschiedene Spezialisierungen für unterschiedliche Fachanwendungen erlauben.

Dreidimensionale Stadt- und Regionalmodelle liegen in unterschiedlichen Detail-

lierungsgraden (Levels of Detail) vor, die aus verschiedenen, voneinander unabhängigen Erfassungen hervorgehen. Ein Objekt kann in mehreren Detailstufen auf verschiedene Weise repräsentiert sein; daraus resultiert eine gewisse Art von 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: Abschnitt 2 stellt das Basismodell für die 3D-Stadt- und Regionalmodellierung vor und zeigt, wie anwendungsspezifische Modelle darauf aufbauen können. Der folgende Abschnitt widmet sich dem Problem der Konsistenz bei der Repräsentation von Geoobjekten unterschiedlicher Detaillierungsgrade. Der Artikel schließt mit einem kurzen Resümee und einem Ausblick auf offene Fragestellungen.

2 3D-Stadt- und Regionalmodellierung

Für die Modellierung von 3D-Geoobjekten wurden bereits verschiedene konzeptuelle Modelle vorgeschlagen. Rein geometrische Modelle repräsentieren zwar die räumliche Ausprägung von 3D-Objekten, unterstützen aber nicht die Repräsentation topologischer Relationen wie z. B. Nachbarschaften, Berührungen und Durchdringungen zwischen Objekten. Um topologische Beziehungen explizit zu machen und somit die räumliche Integrität zu wahren sowie die redundante Speicherung von Objekt(teil-)geometrien vermeiden zu können, werden geometrisch-topologische Modelle verwendet (OOSTEROM et al. 2002, ZLATANOVA 2000,

PLÜMER & GRÖGER 1997, MOLENAAR 1992). Diese Konzepte wurden im ISO-Standard 19107 für die Repräsentation der Geometrie und Topologie räumlicher Objekte verankert (HERRING 2001). Der ISO-Standard 19107 bietet eine Vielzahl von Modellierungsmöglichkeiten für 2D- und 3D-Geometrien, die jedoch an vielen Stellen über das hinausgeht, was für die Repräsentation von 3D-Stadtmodellen erforderlich ist. Die entwickelte Modellierung verwendet deshalb zwar Konzepte des Standards, ist jedoch deutlich kompakter.

Im „Abstract Model“ des OpenGIS Consortiums (OGC) werden Geoobjekte durch sogenannte *Features* repräsentiert. Features stellen Abstraktionen von Realweltobjekten bzw. -phänomenen dar, die räumliche und nicht-räumliche Eigenschaften besitzen können (OpenGIS Consortium, 1999). Darüber hinaus wird in dem vom OGC verabschiedeten Standard „Geography Markup Language“ (GML) zum Austausch und Speichern von Geodaten zwischen Basis- und Anwendungsmodell unterschieden (vgl. Cox et al. 2003). Das Basismodell stellt dabei die grundlegenden Geometrieobjekte und die Modellierungsmechanismen zur Verfügung, die für jede anwendungsspezifische Modellierung benötigt werden. In der im weiteren vorgestellten Modellierung folgen wir zum einen dem Modellierungskon-

zept des Features (Geoobjekte) sowie der Unterscheidung in Basis- und Anwendungsmodell. Das bedeutet, dass das Basismodell multifunktional einsetzbar sein muss für die verschiedenen Anwendungsszenarien wie beispielsweise 3D-Kataster, Facility Management etc. Darüber hinaus muss es so flexibel sein, dass bislang bestehende 3D-Stadtmodelle damit repräsentierbar sind.

Das Basismodell besteht zum einen aus dem geometrisch-topologischen Modell und zum anderen aus den Modellierungsmechanismen für die darauf aufsetzende thematische Anwendungsmodellierung. Ersteres ist noch weiter unterteilt in die geometrisch-topologische Primitiveebene und die darauf aufbauende Aggregationsebene (siehe Abb. 1). Diese Struktur erlaubt die kohärente Modellierung räumlicher und thematischer Differenzierungen.

2.1 Geometrisch-topologisches Modell

Den Kern des Datenmodells bilden 0-, 1-, 2- und 3-dimensionale Primitive. Die Primitive bauen aufeinander auf und realisieren ein Knoten-, Kanten-, Flächen- und Volumenmodell. Da sich höherdimensionale Geometrieobjekte stets aus Objekten der unmittelbar darunter liegenden Dimension zusammensetzen, besitzen nur die Knoten explizite Koordinaten. Kanten werden durch die Angabe des Start- und Endknotens definiert. Flächen werden durch die Angabe des äußeren Flächenumrings und optionalen inneren Flächenumringen beschrieben, wobei innere Flächenumringe zur Repräsentation von Löchern dienen. Flächenumringe bestehen aus einer in einer beliebigen Umlaufrichtung geordneten Menge von Kanten. Volumenkörper werden durch eine geschlossene Randflächendarstellung modelliert (*Boundary Representation*, kurz B-Rep; siehe FOLEY et al. 1995), die aus mindestens vier Flächen bestehen muss. Dabei wird zu jeder Fläche die Orientierung angegeben, um zwischen der Innen- und Außenseite unterscheiden zu können. Gemäß der Forderung der Boundary Representation müssen Volumenkörper vollstän-

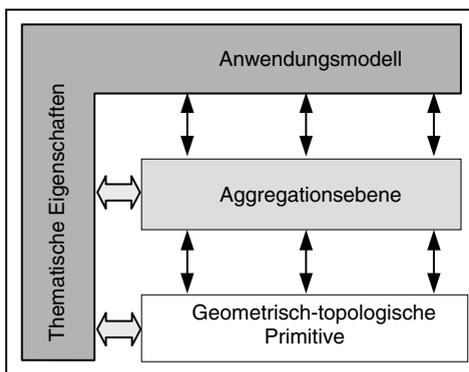


Abb. 1: Struktur der 3D-Stadtmodellierung. Das Anwendungsmodell umfasst thematische und räumliche Aspekte, wobei letztere durch einfache oder aggregierte Primitive repräsentiert werden.

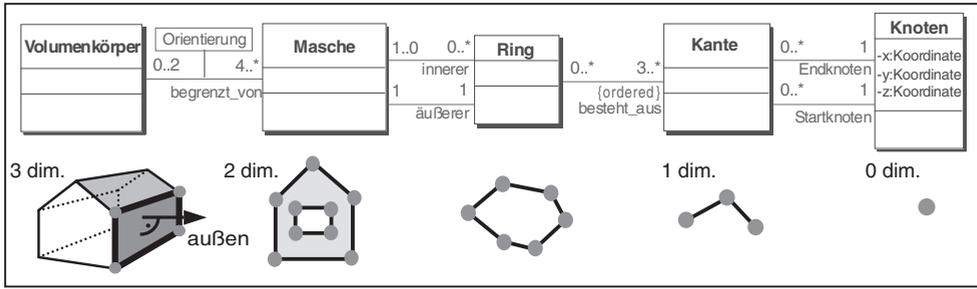


Abb. 2: Geometrisch-topologisches Modell für 0-, 1-, 2- und 3-dimensionale Primitive.

dig geschlossen sein, d. h., es darf kein Weg von innen nach außen geben, ohne dass eine Fläche, Kante oder ein Knoten durchstoßen werden müsste. Abb. 2 zeigt das Datenmodell unter Verwendung der UML-Notation (vgl. BOOCH et al. 1997). Während die Geometrie aller Primitive bis auf den Knoten implizit definiert ist, ist der topologische Zusammenhang zwischen allen Primitiven explizit gegeben.

2.2 Aggregationsebene

Die Aggregationsebene setzt direkt auf den Primitiven auf und realisiert ein rekursives Aggregationsschema für jede Primitivklasse. Dieses Schema wird benötigt, um beispielsweise ein dreidimensionales Objekt durch eine Bestandteilshierarchie darstellen zu können. Ein Gebäude könnte in einzelne Gebäudeteile wie Haus und Garage, und das Haus wiederum in Dach und die einzelnen Stockwerke zerlegt sein (siehe Abb. 3).

Bei Aggregaten ist zu beachten, dass zur Vermeidung von Redundanzen und zur Wahrung der topologischen Konsistenz die sich berührenden Flächen, Kanten und Knoten nur einmal repräsentiert werden dürfen. Die gemeinsamen Teilgeometrien werden von beiden Geometrieobjekten referenziert. Wie im unteren Bereich von Abb. 3 zu erkennen ist, müssen Teilgeometrien dazu ggf. in einen gemeinsam verwendeten und einen separaten Teil partitioniert werden. B-Rep-Modelle berücksichtigen eigentlich nur die sichtbaren Außenflächen von 3D-Objekten. Für das hier vorgestellte Modell wird aber vorgeschlagen, die innenliegen-

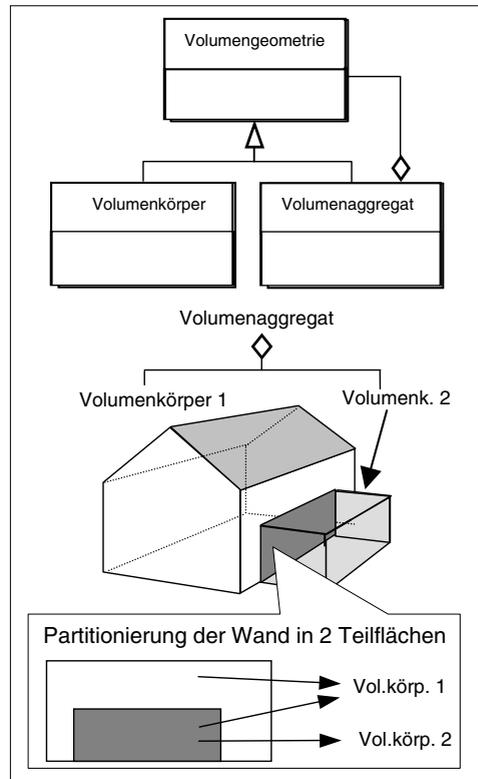


Abb. 3: Komposition komplexer Volumengeometrien durch rekursive Aggregation von Volumenkörpern. Sich berührende Körper besitzen gemeinsame Knoten, Kanten oder Flächen.

den, gemeinsamen Teilgeometrien in dem Modell zu belassen, weil sie erstens die topologischen Bindeglieder zwischen aneinandergrenzenden Teilobjekten darstellen und zweitens bei Löschung von Teilobjekten die verbleibende 3D-Objektgeometrie ansons-

ten nicht mehr geschlossen wäre. Während die Berührung von 3D-Objekten erlaubt ist, muss jedwede Durchdringung von 3D-Körpern vermieden werden, damit keine räumliche Inkonsistenz durch die Mehrfachrepräsentation desselben Volumens entsteht.

2.3 Anwendungsmodellierung

Die Geometrieoberklassen Volumengeometrie, Flächengeometrie, Liniengeometrie und Punktgeometrie bilden die Schnittstelle zur thematischen Modellierung und damit anwendungsspezifischen Modellierung. Geoobjekte werden zunächst bzgl. ihrer semantischen Eigenschaften und Strukturen modelliert, d. h. es werden im Sinne der objektorientierten Modellierung Klassen identifiziert und diese u. a. in Bestandteils- und Generalisierungshierarchien zueinander in Bezug gesetzt (vgl. BOOCH et al. 1997). Bei Klassen mit Raumbezug werden die Geometrieelemente über Assoziationen angebunden. Beispielsweise könnten die meisten Objekte von 3D-Stadtmodellen unter einer Oberklasse „Oberirdisches Bauwerk“ subsumiert werden. Da alle Bauwerke einen Raumbezug haben, würde diese Klasse mit der obersten Geometrie-Klasse „Objektgeometrie“ assoziiert. In dem Beispiel würden Gebäude zunächst als thematische Spezialisierung oberirdischer Bauwerke modelliert und somit als Unterklasse „Gebäude“ von der Oberklasse „Oberirdisches Bauwerk“ abgeleitet werden. Auf dieser spezielleren Ebene könnten auch die räumlichen Eigenschaften weiter differenziert werden. Wenn z. B. ausgedrückt werden soll, dass Gebäude grundsätzlich durch mindestens einen Volumenkörper sowie etwaige flächen- und linienhafte Teilobjekte repräsentiert werden, dann ließen sich diese Anforderungen auf die in Abb. 4 gezeigte Weise in UML-Notation darstellen.

Thematische Eigenschaften von Gebäuden wie z. B. die Adresse oder der Eigentümer würden der entsprechenden Klasse als Attribute hinzugefügt. In Fachanwendungen könnten Gebäude mittels Spezialisierung noch weiter differenziert und darüber mit weiteren Attributen ergänzt werden, beispielsweise für Industriekomplexe, Wohnge-

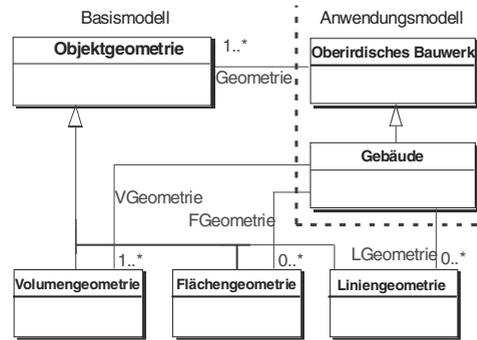


Abb. 4: Beispiel für eine (minimale) anwendungsspezifische Modellierung. Gebäude sind spezielle oberirdische Bauwerke. Sie müssen mindestens eine Volumengeometrie besitzen und können optional zusätzliche Flächen- und Liniengeometrien haben, z. B. zur Repräsentation überstehender Dachflächen oder Antennen.

bäude oder öffentliche Gebäude. Weitere Geoobjekte wie Brücken, Denkmäler und Straßenmöbel könnten auf ähnliche Weise als Unterklassen von „Oberirdisches Bauwerk“ abgeleitet werden. Jede dieser Klassen würde den allgemeinen Raumbezug durch eigene Assoziationen mit den entsprechend verwendeten Geometrie-Klassen konkretisieren.

3 Wahrung der Konsistenz zwischen verschiedenen Detailebenen

Die bisherigen Betrachtungen von 3D-Stadt- und Regionalmodellen beschränkten sich auf Geoobjekte mit genau einer geometrischen Repräsentation. Viele Anwendungen erfordern jedoch das Verwalten und gleichzeitige Vorhalten mehrerer Repräsentationen desselben Objekts. Die klassische Anwendung, die dies nutzt, ist die effiziente Visualisierung (KÖNINGER & BARTEL 1998, FOLEY et al. 1995, GUTHE & KLEIN 2003), bei der ein Objekt in mehreren Detaillierungsgraden („Level of Detail“, im Folgenden „LoD“ abgekürzt) vorliegt, so dass Objekte im Vordergrund sehr detailliert darge-

stellt werden können, während weiter entfernt liegende Objekte sehr viel größer erscheinen. Neben der Visualisierung können jedoch auch die in multifunktionalen GIS erforderlichen Analyseverfahren durch Vorkhaltung mehrerer Repräsentationen eines Objekts beschleunigt werden. Soll zum Beispiel das Volumen umbauten Raumes einer Menge von Gebäuden ermittelt werden, so kann dies effizient durch Betrachtung der Gebäude mit einem niedrigen Detaillierungsgrad geschehen; die Berücksichtigung detaillierterer Repräsentationen ist hier nicht erforderlich.

Effizienzgesichtspunkte sind jedoch nicht der einzige Grund für die Betrachtung mehrerer Repräsentationen verschiedener Detaillierungsgrade. Bei einer hinsichtlich der Flächendeckung inhomogenen Datenverfügbarkeit kann durch dieses Konzept eine optimale Ausnutzung der vorhandenen Daten erfolgen. Oft liegen flächendeckend gering detaillierte Daten – z. B. ein Blockmodell einer Stadt – vor, während für ausgewählte Gebiete vereinzelt sehr detaillierte Gebäuderepräsentationen verfügbar sind – etwa einzelne Architekturmodelle. Eine Analysemethode sollte hier in der Lage sein, flexibel die detaillierten Daten dort zu nutzen, wo diese vorhanden sind, und die größeren Daten nur in dem Fall, wo keine detaillierteren vorhanden sind.

Der LoD-Begriff, der in der Computer-Graphik verwendet wird (z. B. FOLEY et al. 1995, GUTHE & KLEIN 2003), hat zwar hinsichtlich seiner Definition einige Ähnlichkeiten mit dem LoD-Konzept im GIS-Kontext. Der grundlegende Unterschied liegt jedoch darin, dass im Bereich der Computer-Graphik nur das detaillierteste Modell gespeichert wird, während alle größeren Repräsentationen daraus bei Bedarf automatisch abgeleitet werden. Folglich liegt hier der Fokus auf Verfahren der geometrischen Simplifizierung, die effizient diese Ableitung ermöglichen. Im GIS-Kontext stellt sich die Situation ganz anders dar, da hier oftmals verschiedene Repräsentationen desselben Objekts getrennt voneinander erfasst und somit auch getrennt voneinander gespeichert werden. Ein Beispiel, das dem Bereich

3D-Stadtmodelle entnommen ist, wäre ein Gebäude, das erstens eine Repräsentation als Blockmodell hat, das aus dem Katastergrundriss mit einer geschätzten Höhe abgeleitet ist, zweitens photogrammetrisch erfasst wurde und drittens als hochdetailliertes Architekturmodell vorliegt. Das Problem ist hier nicht die Ableitung einer Detaillierungsebene aus einer anderen, sondern vielmehr die konsistente Speicherung und Verwaltung heterogener Repräsentationen.

Das Problem bei der Verwaltung mehrerer LoD liegt darin, dass zwar mehrere Repräsentationen gespeichert werden, aber für jedes Objekt sichergestellt werden muss, dass nur genau eine Repräsentation bei Visualisierungen oder Analysen berücksichtigt wird. Kein Teil des Raumes darf dabei mehrfach repräsentiert werden. Im Folgenden wird dieses Problem auf der Modellierungsebene behandelt.

Die Menge der Repräsentationen von Objekten, in denen kein Objekt mehrfach repräsentiert ist, wird im Weiteren als *Sicht*¹ bezeichnet. Eine Sicht ist die Menge von Repräsentationen, die Voraussetzung für eine konsistente Visualisierung oder Analyse ist.

Die Schwierigkeit bei der Verwaltung mehrerer Repräsentationen desselben Objekts zur Herleitung konsistenter Sichten ergibt sich daraus, dass die Beziehung zwischen den einzelnen Repräsentationen von Objekten vielschichtig sein kann – vor allem hinsichtlich der Bestandteilshierarchie zwischen Objekten in verschiedenen LoD. Diese Beziehungen lassen sich in drei Klassen einteilen, die alle möglichen Relationen abdecken:

1. Ein Objekt hat eine eigenständige, einzelne Repräsentation in einigen LoD.

¹ Der Begriff „Sicht“ (engl.: *view*) bezeichnet in der GIS-Literatur die unterschiedlichen graphischen Repräsentationen eines Objekts (COORS & FLICK 1998, KÖNINGER & BARTEL 1998). Wir benutzen diesen Begriff mit einer anderen Bedeutung, die der im Datenbankkontext (ULLMAN 1988) entspricht.

2. Die Repräsentationen von Objekten bilden eine totale Hierarchie, d. h. ein Objekt auf einer Detaillierungsebene ist in genau einem Aggregat auf der nächst höheren Ebene enthalten.
3. Die Repräsentationen von Objekten bilden höchstens eine partielle Hierarchie, d. h. nicht jede Repräsentation ist Teil einer Aggregation auf der nächst höheren Ebene. Dies ist der allgemeinste Fall, der die beiden ersten umfasst.

Diese drei Fälle werden nachfolgend einzeln diskutiert, durch Beispiele illustriert und mit UML modelliert. Es werden Konsistenzbedingungen angegeben, die in jedem der drei Fälle die Mehrfachrepräsentation des Raumes bei der Ableitung konsistenter Sichten verhindern.

3.1 Objekte mit einer eigenständigen Repräsentation in jedem LoD

Im einfachsten Fall hat ein thematisches Objekt eine eigenständige Repräsentation in jedem oder einigen LoD. Abb. 5 zeigt ein Beispiel: Ein Gebäude hat eine Repräsentation in dem größten LoD1 als Blockmodell, im etwas feineren LoD2 als Objekt mit einfacher Textur und einfacher Dachstruktur, und in LoD3 als detailliertes Modell mit hoch aufgelöster Textur sowie detaillierten Wand- und Dachstrukturen.

Das UML-Instanzendiagramm² zur Modellierung des Gebäudes zeigt Abb. 6: Ein thematisches Objekt *Gebäude X* hat drei Beziehungen zu verschiedenen Volumengeometrien. Die Instanz *Volumengeometrie1* entspricht dem einfachen Blockmodell in Abb. 5, *Volumengeometrie2* der LoD2-Darstellung und *Volumengeometrie3* dem LoD3.

Abb. 6b) zeigt das zu dem Instanzendiagramm zugehörige UML-Klassendiagramm, in dem die thematische Klasse *Gebäude* für jeden der drei LoD eine Relation

zu der Klasse *Volumengeometrie* hat. Werkzeuge, die mit Daten dieses Modells arbeiten, müssen erkennen können, dass es sich bei den Relationen *LoD1-Geometrie*, *LoD2-Geometrie* und *LoD3-Geometrie* um

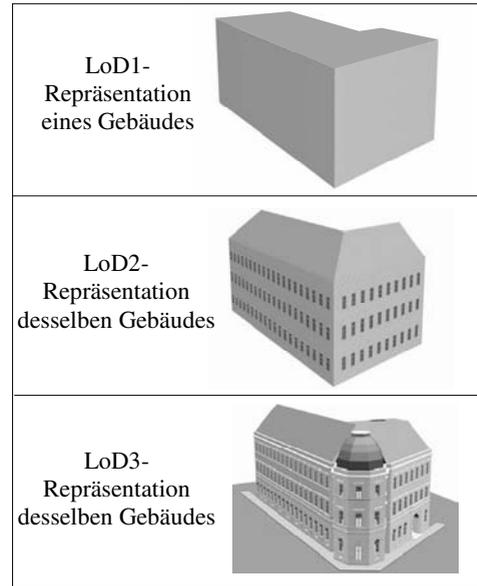


Abb. 5: Der einfachste Fall hinsichtlich der Relationen zwischen LoD: Ein Gebäude hat eine eigenständige Repräsentation in jedem LoD.

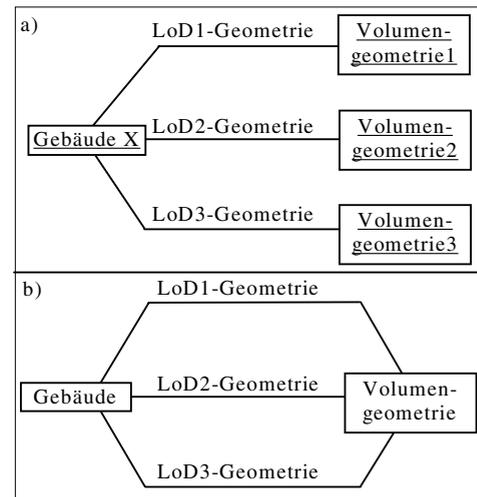


Abb. 6: Modellierung des ersten Falls durch ein UML-Instanzendiagramm (a) und das zugehörige UML-Klassendiagramm (b).

² In einem UML-Instanzendiagramm ist der Name einer Instanz unterstrichen, während die Namen von Klassen in einem UML-Klassendiagramm nicht unterstrichen sind.

spezielle Relationen zwischen thematischen Objekten und deren Repräsentation in einem bestimmten LoD handelt, da sie die Semantik dieser Relationen ausnutzen müssen. Daher sind die Namen dieser Relationen nicht frei wählbar; sondern *qualifiziert*. Dies bedeutet, dass sie nach einem gewissen Schema gebildet werden – in diesem Fall ist dies das Schema *LoDX-Geometrie*, wobei die ganze Zahl $X \in \{0, 1, 2, \dots\}$ die Detaillierungsebene der Repräsentation angibt.

Die Semantik dieser LoD-Relationen ist Voraussetzung für die Formulierung von Konsistenzbedingungen, die bei der Ableitung von Sichten sicherstellen, dass kein Objekt in mehr als einem LoD repräsentiert ist. Im ersten Fall ist diese Bedingung einfach; sie besagt, dass in einer Sicht für jedes thematische Objekt höchstens eine LoD-Relation zu einem Geometrieobjekt existieren darf.

3.2 Totale hierarchische Aggregation

Oft sind Objekte, die in einem LoD repräsentiert sind, in einem größeren LoD nicht mehr als eigenständige Objekte identifizierbar, da sie Teil eines Aggregats sind. Ein Beispiel dafür zeigt Abb. 7: In der Draufsicht auf die Szene in a) gibt es auf der feinsten Ebene neun Gebäude, die auf der mittleren Ebene zu Häuserzeilen aggregiert sind und als Gebäudeobjekt nicht mehr existieren. Diese Zeilen sind auf der größten Ebene wiederum zu einem einzelnen Block verschmolzen. Das Instanzendiagramm in Abb. 7b) veranschaulicht diese hierarchische Baum- bzw. Aggregationsstruktur.

Auf einer abstrakteren Ebene ist die Modellierung dieser Szene in dem UML-Klassendiagramm in Abb. 7c) wiedergegeben. Die hierarchische Beziehung zwischen den Klassen Gebäude, Zeile und Block ist hier durch Aggregationsbeziehungen spezifiziert. Es handelt sich hier um spezifische Aggregationsbeziehungen, was durch das Kreuz in der Aggregationsraute symbolisiert wird und auch durch den qualifizierten Namen *LoD-Aggregation* zum Ausdruck kommt. Die Semantik dieser Beziehung ist, dass es sich um eine spezielle, räumliche Ag-

gregationsbeziehung zwischen denselben Objekten auf benachbarten LoD handelt.

Die Konsistenzbedingung für Sichten nutzt diese spezielle Aggregationsbeziehung; sie lautet im Fall hierarchischer Aggregationen:

Zwei Repräsentationen A und B dürfen in derselben Sicht enthalten sein, wenn A kein Nachfolger von B und B kein Nachfolger von A in dem qualifizierten Aggregationsbaum ist.

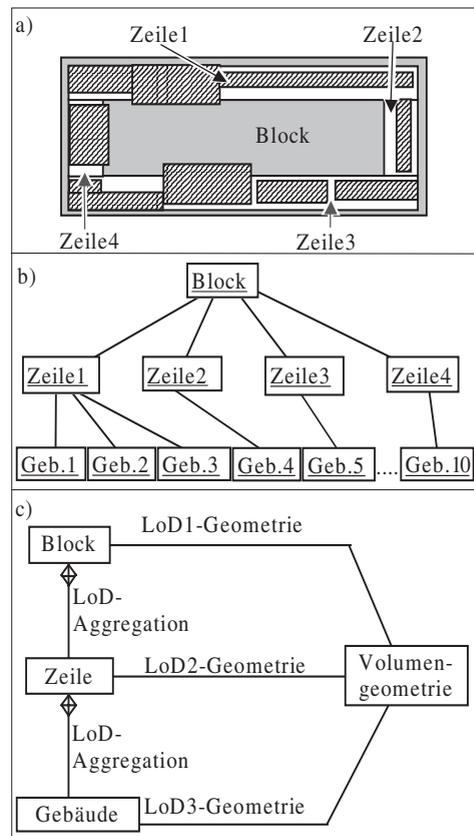


Abb. 7: Veranschaulichung des zweiten Falls an einem Beispiel: Die LoD bilden eine Hierarchie. In a) ist die Draufsicht auf eine Szene mit einem Häuserblock (grau), vier Häuserzeilen (weiß) und neun Gebäuden (schraffiert) gezeigt. Die Aggregationsstruktur ist in b) wiedergegeben, während c) das entsprechende UML-Klassendiagramm zeigt. Das Aggregationssymbol (Raute mit Kreuz) erweitert UML um eine Assoziation mit spezieller Semantik.

Ein *Nachfolger* in einem Baum ist rekursiv definiert: *A* ist *Nachfolger* von *B*, wenn es einen Pfad abwärts von *B* nach *A* im Baum gibt. Die Richtung der Verbindungen im Baum geht dabei von der größeren zur feineren Detaillierungsebene.

Beispiele zur Veranschaulichung dieser Konsistenzbedingung werden anhand des Aggregationsbaumes in Abb. 7 gegeben. Wenn das Objekt *Block* in einer Sicht ist, darf kein anderes Objekt in der Sicht sein, da jedes andere Objekt Nachfolger von *Block* im Baum ist. Analog dürfen *Zeile 1* und *Gebäude 2* nicht in derselben Sicht sein, da es einen Pfad vom ersten zum zweiten Objekt im Baum gibt. Dagegen dürfen *Zeile 1* und *Gebäude 5* bis *Gebäude 9* in einer Sicht enthalten sein, da es weder einen Pfad von *Zeile 1* zu einem dieser Gebäude noch umgekehrt einen von einem dieser Gebäude zu *Zeile 1* gibt.

3.3 Partielle Aggregation

Da in der Praxis die Erfassungen von Daten unterschiedlicher LoD in der Regel unabhängig voneinander geschieht, kann es vorkommen, dass eine hierarchische Aggregation zwischen Objekten verschiedener LoD nicht beobachtbar ist. Als Beispiel zeigt Abb. 8a) Bezirke und Häuserzeilen, die jeweils aus Gebäuden bestehen, jedoch untereinander trotz gegenseitiger Überlappungen nicht in Aggregationsbeziehungen zueinander stehen. Die entsprechenden Instanzen sind in Abb. 8b) gezeigt; sie bilden – im Gegensatz zum zweiten Fall – keine hierarchische Baumstruktur. In der Informatik sind solche Strukturen unter dem Begriff *gerichteter azyklischer Graph* (*Directed Acyclic Graph*, abgekürzt *DAG*) bekannt (CORMEN et al. 1990). Die Richtung der Verbindungen geht auch hier vom größeren LoD, d. h. von oben, zum feineren nach unten.

Das UML-Klassendiagramm für die Szene in Abb. 8a) und b) ist in c) dargestellt. Es nutzt ebenfalls das neue Symbol für die LoD-Aggregation – die Raute mit innen liegendem Kreuz – mit der entsprechenden Semantik, es gibt jedoch keine hierarchische Beziehung zwischen den Klassen *Zeile* und *Bezirk*.

Für eine als DAG repräsentierte Szene wird die Herleitung konsistenter Sichten durch folgende Konsistenzbedingung ermöglicht:

Zwei Repräsentationen A und B dürfen in derselben Sicht vorhanden sein, wenn A und B keinen gemeinsamen Nachfolger im entsprechenden DAG haben.

Die Anwendung dieser Konsistenzbedingung auf den DAG in Abb. 8b) ergibt z. B., dass *Bezirk A* und *Bezirk B* in derselben Sicht vorkommen dürfen, da beide keine gemeinsamen Nachfolger haben. Gleiches gilt

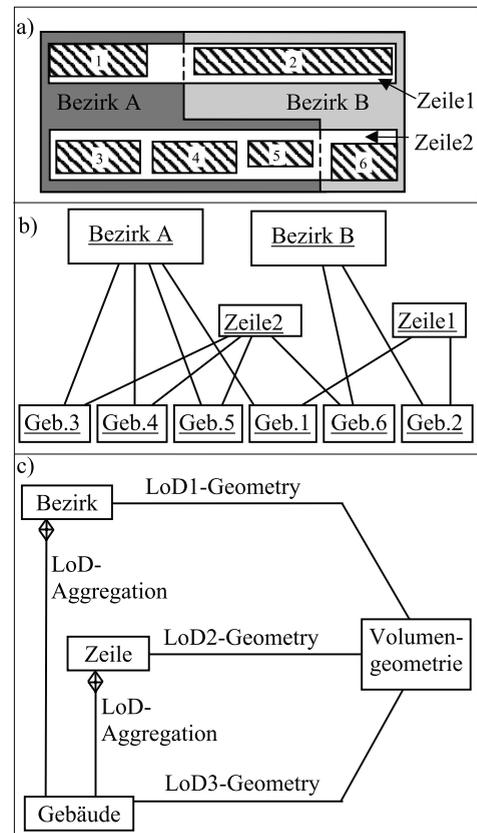


Abb. 8: Beispiel für den dritten Fall. Die Szene in a) aggregiert Gebäude zu Zeilen und zu Bezirken, während es keine Hierarchie zwischen Zeilen und Bezirken gibt. Abb. b) zeigt das UML-Instanzen- und c) das zugehörige Klassendiagramm, welches das neue LoD-Aggregations-symbol (Raute mit Kreuz) verwendet.

für *Bezirk A*, *Gebäude 2* und *Gebäude 6*. Dagegen darf *Bezirk B* nicht mit *Zeile 2* kombiniert werden, da beide einen gemeinsamen Nachfolger – *Gebäude 6* – haben.

Die Konsistenz von Sichten ist durch die obige Bedingung nur gewährleistet, wenn eine weitere Annahme erfüllt ist: Die detaillierteste Ebene muss vollständig in dem Sinn sein, dass jede Überlappung auf anderen Ebenen dort repräsentiert ist. In dem Beispiel in Abb. 8 war dies der Fall; Abb. 9 zeigt jedoch eine Szene, die aufgrund einer unvollständigen Datenerfassung diese Annahme verletzt. Die Überlappung zwischen *Bezirk A* und *Zeile 1* wird z. B. durch die Konsistenzbedingung nicht aufgedeckt, da beide keinen gemeinsamen Nachfolger in dem DAG in Abb. 9b) haben. In c) ist dagegen eine Vervollständigung der detailliertesten Ebene dargestellt, die die obige Annahme erfüllt und zu konsistenten Sichten führt.

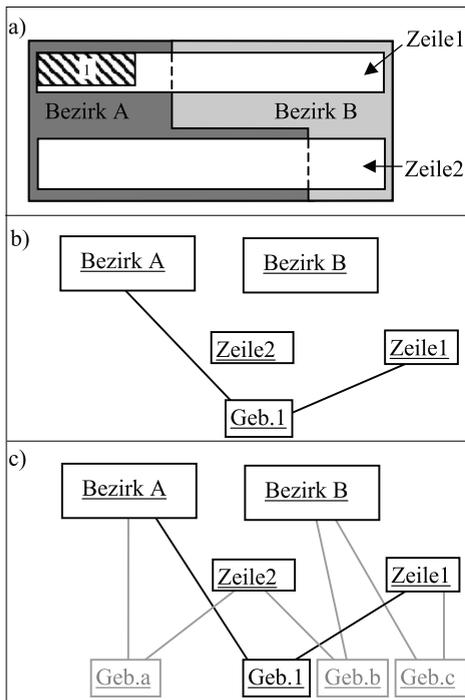


Abb. 9: Eine Szene, bei der die detaillierteste Ebene der Gebäude unvollständig ist (a und b). Die Vervollständigung dieser Ebene (grau) ist in c) dargestellt.

3.4 Verwandte Ansätze

Das Problem der Herleitung der Relationen zwischen verschiedenen, unabhängig voneinander erfassten LoD wird unter anderem in SESTER et al. (1998) und ZIPF & SCHILLING (2003) diskutiert. Diese Ansätze verhalten sich komplementär zu dem hier vorgestellten, da hier der Fokus auf der konsistenten Verwaltung der Beziehungen liegt, und nicht auf deren gegenseitigen Herleitung.

Die Verwaltung verschiedener LoD wird in COORS & FLICK (1998) behandelt, jedoch ausschließlich im Kontext der Visualisierung. Dieser Ansatz ist beschränkt auf den hier betrachteten ersten Fall, bei dem ein Geoobjekt einzelne Repräsentationen in jedem LoD hat. Die schwierigeren Aggregationsbeziehungen werden nicht behandelt. KÖNINGER & BARTEL (1998) stellen Beispiele für hierarchische Aggregationen vor, unterscheiden jedoch nicht zwischen Bestandteils- und LoD-Aggregationen. Die Verwaltung hierarchischer Aggregationen wird ebenfalls in VANGENOT (2002) betrachtet, wobei jedoch der dritte hier behandelte Fall der nichthierarchischen Beziehungen und deren Kombination mit Bestandteilshierarchien nicht berücksichtigt wird.

Die hier beschriebene totale hierarchische Aggregation hat enge Bezüge zu dem Konzept der *Geschachtelten Landkarten* (GRÖGER 2000, PLÜMER & GRÖGER 1996, 1997), die sich jedoch auf die Beziehung zwischen auseinander geometrisch strikt abgeleiteten Geoobjekten – wie z. B. Bundesländer und Landkreisen/kreisfreie Städte – bezieht und nicht wie hier auf unabhängig voneinander erfasste. Das von KAINZ et al. (1993) beschriebene mengentheoretische Konzept des Verbandes (engl.: Lattice) zur Modellierung der Enthaltenseins-Beziehung zwischen Geoobjekten ist wesentlich aufwändiger als das hier beschriebene, da es die vollständige Auflistung aller Aggregationsbeziehungen zwischen allen Hierarchieebenen fordert.

4 Resümee und Ausblick

Die vorgestellte Basismodellierung stellt einen Rahmen für die multifunktionale

mehrskalige Repräsentation von 3D-Stadt- und Regionalmodellen dar. Das Modell setzt die Konzepte des ISO-Standards 19107 um, ist aber gleichzeitig deutlich kompakter in der Darstellung der räumlichen Sachverhalte. Es bildet den Ausgangspunkt für weiter gehende anwendungsspezifische 3D-Stadtmodellierungen. Durch die explizite Modellierung von Geometrie und Topologie lässt sich die räumliche Konsistenz überprüfen und wahren. Gerade geometrisch-topologische Modelle sind besonders zur redundanzfreien Implementation auf der Basis von relationalen, objektrelationalen oder objektorientierten Datenbanken geeignet (OOSTEROM et al. 2002, ZLATANOVA 2000, ULLMAN 1988). Darüber hinaus wurde in dem Beitrag ein Konzept zur Repräsentation räumlicher Objekte in unterschiedlichen Detaillierungsgraden vorgestellt, das die Konsistenz von 3D-Szenen mit gemischt detaillierten Geobjekten über komplexe Aggregationsbeziehungen hinweg sicher stellt.

Mit der Verabschiedung der „Geography Markup Language 3“ (GML 3) durch das Open GIS Consortium (COX et al. 2003) steht nunmehr auch ein Standard zur Speicherung und zum Austausch geometrisch-topologischer 3D-Daten zur Verfügung. Das vorgestellte Modell lässt sich einfach auf GML 3 abbilden; Details sind in KOLBE & GRÖGER (2003) und GRÖGER & KOLBE (2003) beschrieben.

Künftig wird es darum gehen, ausgehend von dem Basismodell spezifische Modelle für bestimmte Anwendungsbereiche zu definieren. In der Special-Interest-Group 3D (SIG 3D) der Initiative Geodateninfrastruktur NRW arbeiten Kommunen, Wissenschaftler und GIS-Hersteller bereits gemeinsam an der Entwicklung eines einheitlichen Datenmodells für 3D-Stadtmodelle, um die Interoperabilität auch auf semantischer Ebene herzustellen (KOLBE 2003).

Ein offenes Problem ist die Berücksichtigung von 3D-Modellen aus dem Architekturbereich. Im *Computer Aided Architectural Design* (CAAD) werden 3D-Objekte typischerweise nicht mittels Boundary Representation, sondern unter Verwendung der konstruktiven Festkörpergeometrie (*Construc-*

tive Solid Geometry, CSG) modelliert. CSG beschreibt 3D-Objekte durch die mengentheoretischen Operationen Vereinigung, Differenz und Schnitt auf volumetrischen Primitiven (FOLEY 1995). Aufgrund der grundsätzlichen Differenz in der Art der räumlichen Repräsentation gestaltet sich die Integration von BRep und CSG schwierig (FÖRSTNER & PALLASKE 1993). Erschwert wird dies ferner dadurch, dass CSG weder in ISO 19107 noch in GML3 berücksichtigt wird.

Danksagung

Die vorgestellten Konzepte stützen sich auf Ergebnisse einer Studie für die Stadt Wuppertal, an der neben den Autoren noch WOLFGANG FÖRSTNER und ANSGAR BRUNN vom Institut für Photogrammetrie der Uni Bonn beteiligt waren. Wir danken den Mitgliedern der Arbeitsgruppe Modellierung der SIG 3D der 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 und TILL BABERG für die Mithilfe bei der Erstellung von Abbildungen.

Literatur

- BOOCH, G., RUMBAUGH, J. & JACOBSON, I., 1997: Unified Modeling Language User Guide. – Addison-Wesley.
- COORS, V., 2001: Feature-preserving Simplification in Web-based 3D-GIS. – In: BUTZ et al. (Eds.): Int. Symp. on Smart Graphics. Proceedings 2001. – ACM Press, New York.
- 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.
- FÖRSTNER, W. & PALLASKE, R., 1993: Mustererkennung und 3D-Geoinformationssysteme. –

- Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, **61** (5): 167–177.
- FOLEY, J., VAN DAM, A., FEINER, S. & HUGHES, J., 1995: Computer Graphics: Principles and Practice. – 2nd ed., Addison Wesley.
- GRÖGER, G., 2000: Modellierung raumbezogener Objekte und Datenintegrität in GIS. – Wichmann: Heidelberg.
- GRÖGER, G. & KOLBE, T.H., 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.
- GUTHE, M. & KLEIN, R., 2003. Efficient NURBS Rendering using View-Dependent LOD and Normal Map. – Journal of WSCGs (Int. Conf. in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision). Pilzen, Czech Republic, Feb. 3–7.
- HERRING, J., 2001: The OpenGIS Abstract Specification, Topic 1: Feature Geometry (ISO 19107 Spatial Schema), Version 5. OGC Document Number 01-101.
- KAINZ, W., EGENHOFER, M.J. & GREASLEY, I., 1993: Modelling Spatial Relations and Operations with Partially Ordered Sets. International Journal of Geographical Information Systems **7**(3): 215–229.
- 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.
- 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.
- 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.
- SESTER, M., ANDERS, K.-H. & WALTER, V., 1998: Linking Objects of Different Spatial Data Sets by Integration and Aggregation, *Geoinformatica*, **2**(4).
- ULLMAN, J.D., 1988: Principles of Database and Knowledge-Base Systems, Vol. 1. – Computer Science Press.
- VANGENOT, C., PARENT, C. & SPACCAPIETRA, S., 2002: Modelling and Manipulating Multiple Representations of Spatial Data. – Proc. of the Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications. – Ottawa, 2002.
- ZIPF, A. & SCHILLING, 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.
- 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.

Anschriften der Autoren:

Dr. rer. nat. GERHARD GRÖGER, Universität Bonn, Institut für Kartographie und Geoinformation, Meckenheimer Allee 172, D-53115 Bonn.
Tel.: +49 (0)228 73 1764,
Fax: +49 (0)228 73 1753
e-mail: groeger@ikg.uni-bonn.de

Dr. rer. nat. THOMAS H. KOLBE, Universität Bonn, Institut für Kartographie und Geoinformation, Meckenheimer Allee 172, D-53115 Bonn.
Tel.: +49 (0)228 73 1760,
Fax: +49 (0)228 73 1753
e-mail: kolbe@ikg.uni-bonn.de

Prof. Dr. rer. nat. LUTZ PLÜMER, Universität Bonn, Institut für Kartographie und Geoinformation, Meckenheimer Allee 172, D-53115 Bonn.
Tel.: +49 (0)228 73 1750,
Fax: +49 (0)228 73 1753
e-mail: pluemer@ikg.uni-bonn.de

Manuskript eingereicht: August 2003
Angenommen: November 2003