

Interoperabilität in einer 3D-Geodateninfrastruktur

Gerhard Gröger, Thomas H. Kolbe

Institut für Kartographie und Geoinformation,

Universität Bonn

ZUSAMMENFASSUNG

Durch den Aufbau von Geodateninfrastrukturen wird künftig der interoperable, anbieter- und systemübergreifende Zugriff auf Geodaten ermöglicht. Während die Entwicklungen für den Bereich zweidimensionaler Geodaten bereits weit vorangeschritten sind, steht der 3D-Bereich noch am Anfang. In diesem Beitrag wird anhand der Differenzierung in semantische, syntaktische und Schema-Heterogenität zunächst erläutert, welche Interoperabilitätsprobleme sich in 3D-Geodateninfrastrukturen auf unterschiedlichen Ebenen ergeben. Zur Überwindung dieser Probleme wurden von der Special Interest Group 3D (SIG 3D) der Initiative Geodateninfrastruktur NRW entsprechende Konzepte und Lösungsansätze entwickelt, die in diesem Beitrag erstmals vorgestellt und erörtert werden. Schließlich werden weitergehende Probleme, die durch geometrische und topologische Inkonsistenzen zwischen unterschiedlichen 3D-Geodatenbeständen entstehen, erläutert und mögliche Lösungsansätze aufgezeigt.

1 EINLEITUNG

3D-Stadt- und Regionalmodelle erlangen zunehmende Bedeutung in Aufgaben der Architektur, Stadt- und Raumplanung, Vermessung, mobilen Telekommunikation und des Facility Managements. Komplexe Planungen vorhaben wie z.B. der Neubau von Straßen- und Eisenbahntrassen erfordern den Zugriff auf homogen strukturierte, zwei-, zweieinhalb- und dreidimensionale Geodaten unterschiedlicher Quellen und Anbieter. Während die bislang entwickelten Geodateninfrastrukturen (GDIs), den vernetzten und interoperablen Zugriff auf 2D-Geodaten realisieren (VOGES ET. AL. 2002), steht die Berücksichtigung der dritten Dimension noch am Anfang. Im *OpenGIS Consortium* (OGC), das maßgeblich an der Standardisierung von Diensten für GDIs beteiligt ist (PERCIVAL 2002), wird zurzeit mit dem *Web Terrain Service* nur ein Dienst zur einfachen 3D-Visualisierung diskutiert (SINGH 2001). Um die bestehenden Defizite zu identifizieren und zu beheben wurde im Mai 2002 die *Special Interest Group 3D* (SIG 3D) innerhalb der Initiative Geodateninfrastruktur NRW zur Entwicklung offener Standards für die Modellierung von 3D-Geoobjekten und die Spezifikation entsprechender 3D-Dienste für den Zugriff und die Visualisierung gegründet (KOLBE 2003).

Bei der Zusammenführung von 3D-Geodaten, die von unterschiedlichen Anbietern zur Verfügung gestellt werden, und die verschiedene Objekte desselben Gebiets enthalten oder sich auf unterschiedliche Gebiete beziehen, treten eine Vielzahl von Interoperabilitätsproblemen auf. In diesem Artikel werden diese Probleme im Detail erörtert, klassifiziert und die dazu in der SIG 3D erarbeiteten Lösungsvorschläge vorgestellt.

1.1 Interoperabilitätsprobleme bei 3D-Geodaten

Interoperabilitätsprobleme entstehen grundsätzlich dann, wenn unterschiedliche Geodatenansätze in bestimmter Hinsicht heterogen sind. Bisher identifiziert in (BISHR 1998) die folgenden drei Kategorien:

Semantische Heterogenität entsteht, wenn das unterschiedliche Verständnis von Phänomenen der realen Welt zu verschiedenen Abstraktionen von Realweltobjekten führt. So ist eine Straße aus der Sicht des Liegenschaftskatasters ein flächenhaftes Objekt, während bei der Routenplanung Straßen durch netzförmige Strukturen abstrahiert werden.

Mit *Schema-Heterogenität* werden strukturelle Unterschiede bei der Modellierung desselben Objekts bezeichnet. Was z. B. in einem Modell auf Klassenebene differenziert wird, kann in einem anderen Modell durch Attributwerte unterschieden sein.

Die *syntaktische Heterogenität* hebt zum einem auf Differenzen hinsichtlich der Austauschformate und zum anderen auf die Art der räumlichen Repräsentation – z.B. als Vektor- oder Rasterdaten – ab.

Diese drei Kategorien sind struktureller Art und betreffen die Ebene des konzeptuellen Modells. Selbst wenn zu integrierende Datensätze bezüglich dieser drei Kategorien übereinstimmen, können dennoch geometrische und topologische Probleme bei der Zusammenführung entstehen (GRÖGER 2000). Diese Schwierigkeiten betreffen – im Gegensatz zu den von Bisher identifizierten – nicht die Modellebene, sondern die von einzelnen Geoobjekten. Geometrische Probleme entstehen durch Verwendung unterschiedlicher Referenzsysteme, Mess-, Digitalisier- oder Generalisierungsfehler, und können dazu führen, dass neben rein geometrischen Verzerrungen auch topologische Relationen, die in der realen Welt gelten, in den Geodaten verletzt sind.

Im folgenden werden zunächst die sich stellenden strukturellen Interoperabilitätsprobleme von 3D-Geodateninfrastrukturen diskutiert und die jeweils dazu erarbeiteten Lösungsvorschläge vorgestellt. Schließlich werden die Probleme, die durch geometrische und topologische Inkonsistenzen entstehen, erläutert und mögliche Lösungsansätze aufgezeigt.

2 WEGE ZUR SEMANTISCHEN UND SCHEMA-INTEROPERABILITÄT IN 3D

Damit eine Interoperabilität bis auf Anwendungsebene erreicht wird, ist es erforderlich, dass über die syntaktische Kompatibilität hinaus eine gemeinsame Modellierung der anwendungsspezifischen Geobjekte vorliegt. Die Abstraktion beinhaltet eine gemeinsame Begriffsbildung, die formale Modellierung (z.B. in UML) der Geobjekte sowie die Festlegung von Erläuterungsvorschriften und Integrationsbedingungen für die Instanzenbildung.

Im 2D ist die Standardisierung auf Anwendungsebene im Katasterwesen durch die Entwicklung von ALKIS und der nordrhein-westfälischen Umsetzung im Projekt GEOBASIS.NRW bereits weit vorangeschritten. ALKIS ist der von der ADV verabschiedete bundesweite Standard für das Liegenschaftskataster und definiert alle für das Kataster relevanten Objekte auf eindeutige Weise. Hinzu kommen Erläuterungsvorschriften, die spezifizieren, wie Objekte der realen Welt auf Instanzen bzgl. des ALKIS-Modells abzubilden sind (ADV 2002, LVERMA NRW 2002).

Ein wesentliches Ziel der SIG 3D der GDI NRW besteht dementsprechend darin, zunächst eine disziplinübergreifende Definition der Begriffe 3D-Stadt- und Regionalmodell zu erarbeiten, und – davon ausgehend – eine spezifische Modellierung der entsprechenden Geobjekte zu entwickeln. Die besondere Schwierigkeit besteht dabei darin, dass sichergestellt werden muss, dass auf der einen Seite bislang bestehende 3D-Stadmodelle auf dieses Modell abgebildet werden können (Sicherung von Investitionen), aber auf der anderen Seite ein möglichst hoher Grad an Verbindlichkeit erreicht werden muss, damit Anwendungsprogramme künftig tatsächlich anbieter- und organisationsübergreifend auf homogen strukturierte 3D-Geodaten zurückgreifen können. In Anlehnung an ALKIS wird dabei zwischen der Basismodellierung und der darauf aufsetzenden Anwendungsmodellierung unterschieden.

2.1 Basismodellierung

Die Basismodellierung stellt die grundlegenden 3D-Primitive und Modellierungsmechanismen zur Verfügung, die für jede anwendungsspezifische 3D-Stadmodellierung benötigt werden. Das bedeutet, dass sie offen sein muss für verschiedene Anwendungsszenarien wie z.B. 3D-Kataster, Facility Management usw. Zur Gewährleistung der Abwärtskompatibilität müssen ferner bereits existierende Stadmodelle damit repräsentierbar sein.

Geobjekte stellen Abstraktionen von Realweltobjekten und -phänomenen dar, wobei zwischen räumlichen und nicht-räumlichen Eigenschaften unterschieden wird. Dementsprechend besteht das entwickelte Basismodell

zum einen aus der geometrisch-topologischen Modellierung und zum anderen aus dem Bereich der thematischen Modellierung. Ersteres ist weiter unterteilt in die geometrisch-topologische Primitiveebene und die Aggregationsebene (siehe Abb. 1). Diese Struktur erlaubt die kohärente Modellierung räumlicher und thematischer Differenzierungen. Wenn Geobjekte beispielsweise thematisch differenziert werden, z.B. durch Spezialisierungen oder Aggregationen, können die räumlichen Eigenschaften der einzelnen Entitäten sowohl auf der obersten Ebene als auch auf den darunterliegenden Ebenen assoziiert werden.

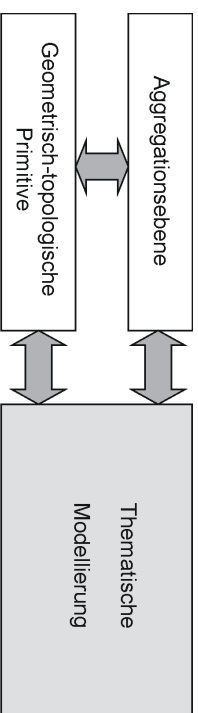


Abb. 1: Kohärente Modellierung geometrisch-topologischer und thematischer Eigenschaften von Geobjekten.

Der Kern des Datenmodells wird durch die geometrisch-topologische Modellierung von 0-, 1-, 2- und 3-dimensionalen Primitiven gebildet. Die Primitive bauen aufeinander auf und realisieren ein Knoten-, Kanten-, Flächen- und Volumennmodell. Dabei besitzen nur die Knotenobjekte Koordinaten; Kanten werden durch die Angabe eines Start- und Endknotens definiert; Flächen werden durch die Angabe der Kanten des Umringspolygons beschrieben. Da Flächen auch Löcher haben können, reicht es nicht nur einen äußeren Flächenumring vorzusehen. Flächen werden aus diesem Grund durch Maschen repräsentiert, die genau einen äußeren Umring und keinen oder mehrere innere (Loch-)Umringe besitzen. Ein Umring ist eine in einer beliebigen Umlaufrichtung geordnete Menge von Kanten. Abb. 2 zeigt das UML-Diagramm des Knoten-, Kanten- und Flächenmodells.

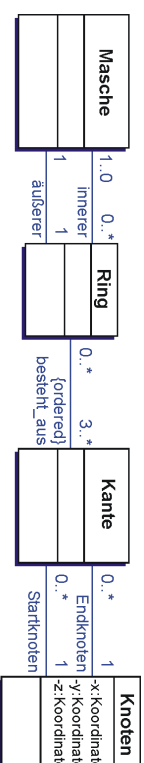


Abb. 2: Geometrisch-topologisches Knoten-, Kanten- und Flächenmodell

Volumenkörper werden durch eine geschlossene Randflächenbegrenzung dargestellt (Boundary Representation, kurz B-Rep; s. FOLEY ET. AL. 1995),

die aus mindestens vier Flächen bestehen muss. Jede Fläche wird durch eine orientierte Masche repräsentiert. Die Orientierung gibt dabei an, welche Seite der Masche nach innen bzw. nach außen zeigt. Abb. 3 zeigt das um Volumenkörper erweiterte UML-Diagramm.

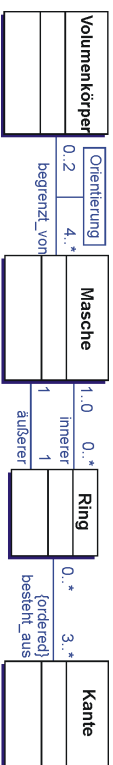


Abb. 3: Geometrisch-topologische Modellierung von Volumenkörpern

Objekte der Klasse Volumenkörper müssen dabei vollständig geschlossen sein, d.h. es darf kein Spalt bleiben, durch den man von außen in das Innere gelangen könnte ohne durch eine Fläche stoßen zu müssen. Diese Eigenschaft ist u.a. notwendige Voraussetzung für die Berechenbarkeit des umschlossenen Volumens. Gebäude bzw. Gebäudeteile, die durch Volumenkörper repräsentiert werden sollen, müssen deshalb ebenfalls geschlossen sein, d.h. es müssen auch die Bodenflächen enthalten sein.

Über den Primitiven befindet sich die Aggregationsebene, die eine beliebige (rekursive) Aggregation gleichartiger Geometrieobjekte erlaubt. Diese

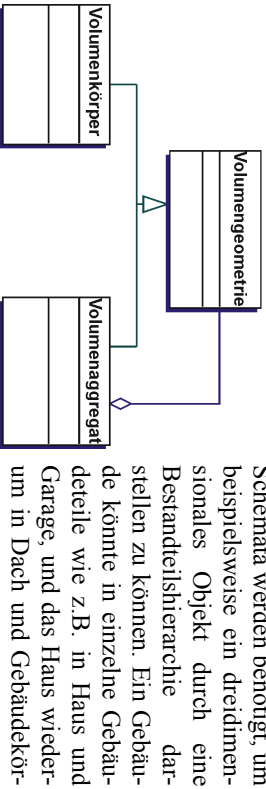


Abb. 4: Aggregation von Volumenkörpern zu Volumengeometrien

Volumenkörper. Da diese zur Definition der Geometrie der Geoobjekte verwendet werden, heißen die Klassen entsprechend *Punktgeometrie*, *Liniengeometrie*, *Flächengeometrie* und *Volumengeometrie*. Alle vier Geometrietypen besitzen die gemeinsame Oberklasse *Objektgeometrie*.

Die Geometrieklassen stellen die Schnittstelle zur anwendungsspezifischen Modellierung dar: Geoobjekte einer bestimmten Anwendung werden zunächst auf der thematischen Ebene modelliert. Anschließend werden die raumbezogenen Eigenschaften durch Bezüge zu den entsprechenden Geometrieklassen ausgedrückt. Beispielsweise könnten alle Objekte eines Stadtmodells als oberirdische Bauwerke repräsentiert werden, deren

Raumbezug jeweils allgemein durch die Assoziation zur Oberklasse *Objektgeometrie* hergestellt wird. Ein Gebäude wäre dann eine thematische Spezialisierung der Klasse *Oberirdisches Bauwerk*. Wenn z.B. ausgedrückt werden soll, dass Gebäude grundsätzlich durch mindestens einen Volumenkörper sowie etwaige flächen- und linienhafte Teilobjekte repräsentiert werden, dann heißen sich diese Anforderungen auf die in Abb. 5 gezeigte Weise in UML darstellen.

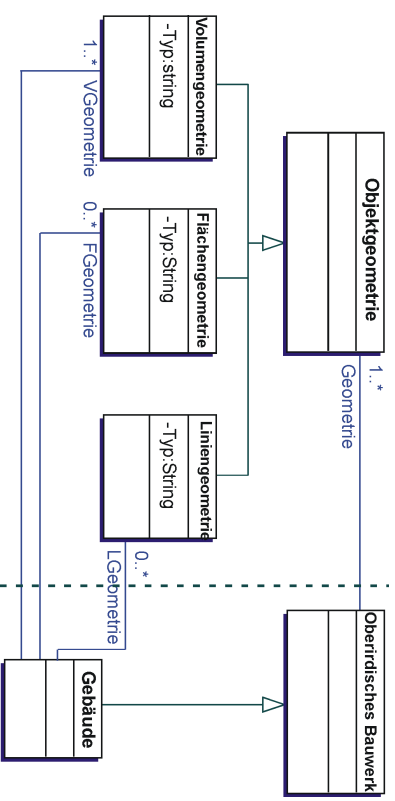


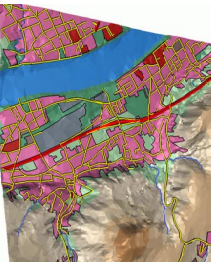
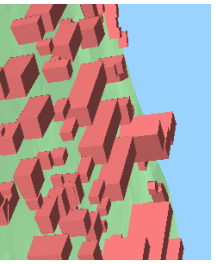
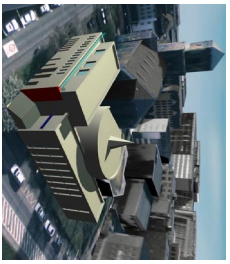
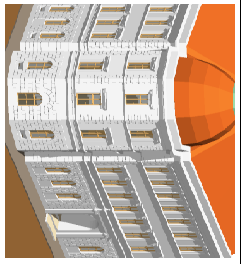
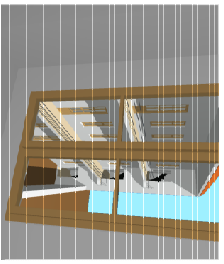
Abb. 5: Verbindung von geometrischer (linke Seite) und thematischer Modellierung (rechte Seite).

2.2 Anwendungsmodellierung

Aufsetzend auf dem Basismodell wird die spezifische Modellierung der für 3D-Stadt- und Regionalmodelle relevanten Geoobjekte betrieben. Da die Art und Zahl der zu repräsentierenden Objektarten wesentlich von der Auflösung bzw. dem Maßstab des 3D-Modells abhängt, wurde zunächst untersucht, welche Auflösungsstufen (Level-of-Details, LODs) unterschieden werden müssen. Im Unterschied zu KÖNINGER UND BARTEL (1998) und ZIPF UND SCHÜLLING (2002) wird nicht in drei sondern fünf LOD-Stufen differenziert. Diese sind auf der folgenden Seite in Tab. 1 dargestellt.

Es wird in der SIG 3D angestrebt, für die verschiedenen Nutzer und Anbieter von 3D-Stadtmodellen (z.B. Kommunen, Telekommunikationsunternehmen, Datenerfasser und -veredler sowie Regionalverbände) eine gemeinsame Anwendungsmodellierung zu erarbeiten. Zur künftigen Definition der einzelnen Objektklassen in den verschiedenen LODs orientieren wir uns dabei u.a. an dem ALKIS-Objektartenkatalog.

Tab. 1: Die fünf unterschiedenen Detaillierungsstufen (Level-of-Details)

	<p>LOD 0 – Regionalmodell</p> <p>bis auf 3D-Landmarks nur 2,5D DGM</p> <p>Erfassungsgeneralisierung: <i>maximal; Klassifizierung nach Flächennutzung</i></p> <p>Dachform/-struktur: <i>keine</i></p> <p>Punktgenauigkeit (Lage/Höhe): <i>> 5m / > 5m</i></p>
	<p>LOD 1 – Stadt- / Standortmodell</p> <p>„Klotzchenmodell“ ohne Dachstrukturen</p> <p>Erfassungsgeneralisierung: <i>Objektblöcke in generalisierter Form > 6m*6m Grundfläche</i></p> <p>Dachform/-struktur: <i>ebene Flächen</i></p> <p>Punktgenauigkeit (Lage/Höhe): <i>5m / 5m</i></p>
	<p>LOD 2 – Stadt- / Standortmodell</p> <p>Texturierte Modelle; differenzierte Dachstrukturen; Vegetationsmerkmale (z.B. Bäume)</p> <p>Erfassungsgeneralisierung: <i>Objektblöcke in generalisierter Form > 4m*4m Grundfläche</i></p> <p>Dachform/-struktur: <i>Dachtyp und Ausrichtung</i></p> <p>Punktgenauigkeit (Lage/Höhe): <i>2m / 1m</i></p>
	<p>LOD 3 – Stadt- / Standortmodell</p> <p>Geometrisch fein ausdifferenzierte Architekturmodelle; Vegetation; Straßenmöbel</p> <p>Erfassungsgeneralisierung: <i>Objekte in realer Form; > 2m*2m Grundfläche</i></p> <p>Dachform/-struktur: <i>reale Form</i></p> <p>Punktgenauigkeit (Lage/Höhe): <i>0,5m / 0,5m</i></p>
	<p>LOD 4 – Innenraummodell</p> <p>„Begehbare“ Architekturmodelle</p> <p>Erfassungsgeneralisierung: <i>reale Form; Abbildung konstruktiver Elemente und Öffnungen</i></p> <p>Dachform/-struktur: <i>reale Form</i></p> <p>Punktgenauigkeit (Lage/Höhe): <i>0,2m / 0,2m</i></p>

3 ÜBERWINDUNG DER SYNTAKTISCHEN HETEROGENITÄT IN 3D

Die Herstellung der syntaktischen Interoperabilität umfasst nach BISHR (1998) zwei Aspekte: den des Austauschformats und den der Art der räumlichen Repräsentation der Geobjekte.

3.1 Interoperabilität auf Ebene des Austauschformats

Hinsichtlich des Austauschformats besteht der grundsätzliche Ansatz zur Überwindung der syntaktischen Heterogenität in der Verwendung offener, herstellerunabhängiger Standards, die im GIS-Bereich sowohl vom OGC als auch von der *International Organization for Standardization (ISO)* bereitgestellt werden. Mit der *Geography Markup Language (GML3)* (COX ET AL., 2003) des OGC steht seit Anfang dieses Jahres erstmals ein geeigneter offener Standard für die Repräsentation und den Austausch von dreidimensionalen, vektororientierten Geodaten zur Verfügung. Syntaktisch basiert er auf der Sprache *XML (Extensible Markup Language)*, dem wichtigsten Standard für den Datenaustausch im WWW. Inhaltlich umfasst GML3 die Modellierung von Geodaten mit deren geometrisch-topologischen Eigenschaften, Zeitbezügen und Darstellungsvorschriften.

Die Modellierung des Raumbezugs von GML3 beruht auf dem Standard *ISO 19107 Spatial Schema* (HERRING, 2002), der gemeinsam von der ISO und dem OGC erarbeitet wurde. GML3 setzt diesen Standard jedoch nicht exakt um, da einige Beschränkungen der Sprache XML – wie z.B. der Ausschluss von Mehrfachvererbung – zu einer leicht modifizierten Modellierung führten. Ebenso wurden aus pragmatischen Gründen auf einige Aggregationsebenen verzichtet. Im Wesentlichen bietet GML3 jedoch die Möglichkeiten von ISO „Spatial Schema“.

Die syntaktische Interoperabilität von 3D-Stadtmodellen kann also auf Basis von GML3 gewährleistet werden – vorausgesetzt, diese Modelle lassen sich mit GML3 abbilden, d.h. als Anwendungsschema in GML3 formulieren. Ob dies möglich ist und welche Probleme dabei auftreten, wird im Folgenden diskutiert; die dabei relevanten Aspekte sind:

- die Repräsentation thematischer Eigenschaften der Geobjekte,
- die Beziehung der Geobjekte zu deren Geometrie und Topologie; insbesondere die Fähigkeit, mehrere Level-of-Details zu repräsentieren,
- die Repräsentation der Geometrie und Topologie, und
- die Repräsentation der graphischen Darstellung.

Hinsichtlich der thematischen Eigenschaften von Geoobjekten ist GML3 sehr offen und stellt keine besonderen Restriktionen an die Modelle. Insbesondere sind die Konzepte der Vererbung und der Aggregation enthalten; die Repräsentation von 3D-Stadtmodellen ist folglich möglich.

Da GML3 durch „Geometry Properties“ die Verknüpfung eines Geoobjekts zu beliebig vielen, heterogenen Geometrien erlaubt, ist die Repräsentation mehrerer Level-of-Detail, die auch von unterschiedlichem Geometrietyp sein können, für ein Geoobjekt möglich.

GML3 und die zugrunde liegende ISO-Norm „Spatial Schema“ realisieren den Raumbezug durch das Konzept der „Boundary Representation“. Dieses setzt sich auf der untersten Ebene aus Primitiven für null-, ein-, zwei- und dreidimensionalen Objekte zusammen. Sie ähneln den Primitiven Knoten, Kante, Masche und Volumengeometrie des 3D-Stadtmodells. Bei GML3 wird jedoch zwischen geometrischen Primitiven, die durch Koordinaten repräsentiert sind, und topologischen Primitiven, die für die topologischen Relationen verantwortlich sind und die keinen unmittelbaren geometrischen Eigenschaften besitzen, unterschieden. Da die Primitive des 3D-Stadtmodells geometrische und topologische Eigenschaften in einem Objekt vereinigen, muss eine entsprechende Abbildung zwischen beiden Konzepten definiert werden. Im ISO-Standard „Spatial Schema“ ist hierzu das Anwendungsschema „Simple Topology“ definiert, das auch zur Repräsentation des Raumbezugs bei ALKIS-Objekten verwendet wird. Da dieses Schema nur den zweidimensionalen Fall abdeckt, muss es entsprechend um die Abbildung von Volumengeometrien auf geometrische und topologische Primitive erweitert werden. So können unter Verwendung der GML3-Realisierung der „Simple Topology“ die Primitive des 3D-Stadtmodells repräsentiert werden.

Das rekursive Aggregationskonzept von GML3 entspricht exakt dem des 3D-Stadtmodells, sodass hier die Abbildung sehr einfach realisiert werden kann. Auch hinsichtlich der Repräsentation von Digitalen Geländemodellen durch Dreiecksvermaschungen (TINs) ähneln sich beide Modelle sehr; insbesondere erlaubt GML3 die gemeinsame Nutzung von Kanten sowohl als Dreiecksanten als auch als Kanten im der der Geometrie von Gebäuden, um die topologische Verknüpfung zwischen beidem zu realisieren.

Die Repräsentation der graphischen Darstellung von Stadtmodellen erfordert zum einen die Symbolisierung auf der Ebene von Objektklassen, um z.B. in einem Blockmodell alle Gebäude in einer einheitlichen Farbe oder einer einheitlichen künstlichen Textur erscheinen zu lassen. Andererseits müssen aber auch individuelle Texturen, wie etwa ein reales, geocodiertes Photo, auf der Ebene konkreter einzelner Objekte (Instanzen) zugeordnet

werden können. Beides unterstützt GML3, da die graphische Darstellung durch sog. „Style Properties“ erfolgt, die sich entweder auf ganze Klassen von Geoobjekten oder auf individuelle Geoobjekte bezieht. „Parametrisierte Stile“ ermöglichen es ferner, die graphische Ausgestaltung abhängig von Attributwerten des Geoobjekts flexibel zu halten. Hinsichtlich der Art der graphischen Ausgestaltung orientiert sich GML3 an der Sprache *SVG (Scalable Vector Graphics)* (W3C 2002), die sowohl symbolische Stile für Punkte, Linien und Flächen als auch individuelle Texturen für Flächen beinhaltet. Bzgl. der Behandlung von Texturen hat SVG jedoch zwei wesentliche Einschränkungen: zum einen sind die Texturen nur auf ein rechteckiges Format beschränkt, während bei Stadtmodellen durchaus auch andere Formen auftreten können. Zum anderen ist SVG auf 2D-Strukturen beschränkt, sodass für die geometrische Zuordnung einer Textur zu einer im 3D liegenden Fläche, d.h. für die Aufbringung der Textur, die Mittel von SVG nicht ausreichen. Hier besteht im Rahmen von GML3 noch Bedarf an Ergänzungen, die über die Möglichkeiten von SVG hinausgehen.

3.2 Art der räumlichen Repräsentation

Das zweite von BISNR (1998) angeführte Kriterium für die syntaktische Interoperabilität ist die der Art der räumlichen Repräsentation. Wie bereits dargelegt, ist GML3 wie auch ISO „Spatial Schema“ ausschließlich auf das Konzept der *Boundary Representation* ausgerichtet. In vielen für dreidimensionale Stadtmodelle relevanten Bereichen wie z.B. der Stadtplanung oder der Architektur wird jedoch eine alternative Modellierungsform verwendet, die *Constructive Solid Geometry*, (CSG) (FOLEY ET AL. 1995). Die Speicherung und Übertragung solcher Geometrien ist mit GML3 zunächst nicht möglich; zumindest nicht im Rahmen des zugrunde liegenden Geometrimodells. Um die Übertragung von CSG-Geometrien, die für viele Anwendungen wünschenswert sind, dennoch zu ermöglichen, bieten sich prinzipiell zwei Wege an: Zum einen kann GML3 außerhalb des standardisierten Geometrimodells um CSG-Elemente erweitert werden; die erforderliche Flexibilität weist GML3 auf. Die zweite Alternative ist die Einbindung von Standards zur Repräsentation von CSG, die außerhalb von GML und dem GIS-Bereich entwickelt wurden. Hier bietet sich die Verwendung des im Hochbau- und Architekturbereich etablierenden Standards *Industry Foundation Classes* (IAI, 2002) an, der von der ISO genormt wurde und auch in der Sprache XML vorliegt; die syntaktische Interoperabilität ist also auch hier gewahrt.

Ein weiteres, zu dem vorherigen eng verwandtes Defizit von GML3 besteht darin, dass keine *parametrisierten Prototypen* (FOLEY ET AL., 1995)

übertragen werden können. Diese werden bei der Visualisierung von Stadtmodellen häufig verwendet, um oft vorkommende, gleichartige Objekte, die sich ausschließlich in einigen wenigen Parametern unterscheiden, effizient repräsentieren zu können. Beispiele für solche Objekte sind Ausgestaltungsobjekte wie Bäume, aber auch Häuser einer gleichförmigen Siedlung.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Herstellung der syntaktischen Interoperabilität durch den Einsatz von GML3 möglich ist; Probleme ergeben sich jedoch bei Verwaltung von Texturen aufgrund von Defiziten von SVG und durch die fehlende Integration von parametrisierten Prototypen und CSG-Geometrien.

4 PROBLEM DER GEOMETRISCH-TOPOLOGISCHEN INTEROPERABILITÄT

In den vorherigen Abschnitten wurde aufgezeigt, wie Interoperabilität auf der Ebene der Modelle – der Schemata, Begriffe, und Definitionen – und der Formate hergestellt werden kann. Dies reicht jedoch nicht aus, um vollständige Interoperabilität zu garantieren: Selbst wenn zwei Datensätze bezüglich der strukturellen, d.h. semantischen und syntaktischen Aspekte übereinstimmen, können auf der Ebene der einzelnen Geobjekte geometrisch-topologische Inkonsistenzen auftreten.

4.1 Fälle geometrisch-topologischer Inkonsistenzen

Derartige Inkonsistenzen treten bereits im zweidimensionalen Fall auf. LAURINI (1998) unterscheidet bei seinen Untersuchungen zwischen der *zonalen Fragmentierung* und der *Layer-Fragmentierung*:

- Die *zonale Fragmentierung* tritt auf, wenn zwei Datensätze räumlich disjunkte, aneinander grenzende Gebiete mit Objekten gleicher oder ähnlicher Objektart enthalten. Ein Beispiel ist die Integration zweier Datensätze mit den Flurstücken benachbarter Gemeinden. Hier kommt es typischerweise zu Überlappungen und Lücken an der Grenze zwischen beiden Gemeinden.
- Die *Layer-Fragmentierung* betrifft dagegen zwei Datensätze, die beide unterschiedliche Objektarten desselben Gebiets oder sich stark überlappende Gebiete enthalten. Ein Beispiel ist die Integration eines Datensatzes mit Gebäuden und eines mit den zugehörigen Straßen, wobei eine räumliche Überlappung der Gebäude mit den Straßen eine mögliche Fragmentierung wäre.

Bei der Zusammenführung dreidimensionaler Datensätze können neben diesen Fragmentierungen weitere Fehler auftreten. Generell lassen sich die Fehler abhängig von der Dimension der Geodatensätze in die drei Kategorien $2,5D \leftrightarrow 2,5D$, $3D \leftrightarrow 3D$ und $2,5D \leftrightarrow 3D$ unterteilen. Diese werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

4.1.1 Probleme bei der Integration 2,5D mit 2,5D

Der typische Fall einer zonalen Fragmentierung im 3D ist die Zusammenführung zweier benachbarter Geländemodelle (DGMs), die an den gemeinsamen Grenzen nicht zueinander passen. Dabei können zwei Fälle unterschieden werden: beide DGMs können bezüglich der (x/y)-Lage zusammenpassen, nicht jedoch bezüglich der Höhe, oder beide stimmen weder in der Lage noch in der Höhe überein (siehe Abb. 6). Das in Abschnitt 2 vorgestellte Basismodell repräsentiert DGMs durch unregelmäßige Dreiecksvermaschungen (TINs). Konsequenzen des Fehlers bei der Zusammenführung zweier DGMs sind entweder Lücken im resultierenden TIN oder sich überlappende Dreiecke. Letzteres steht im Konflikt mit der Annahme, dass Geländemodelle zweierhalbdimensional sind und somit jedem (x,y)-Lagepunkt maximal ein Höhenwert zugeordnet ist.

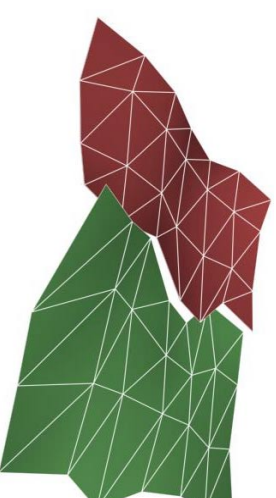


Abb. 6: Inkonsistenz bei der Zusammenführung zweier Dreiecksvermaschungen (TINs), die an der gemeinsamen Grenze geometrisch differieren.

4.1.2 Probleme bei der Integration 3D mit 3D

Analoge Probleme bei der Zusammenführung können auftreten, wenn sich zwei in der Realität benachbarte Gebäude in verschiedenen Datensätzen befinden. Hier lassen sich zwei Arten von geometrisch-topologischen Fehlern unterscheiden: Zumindesten kann es zu einer unerlaubten Durchdringung von Volumenkörpern kommen, zum anderen kann eine Klaffung zwischen beiden Gebäuden entstehen. Beide Fälle sind in Abb. 7 skizziert.

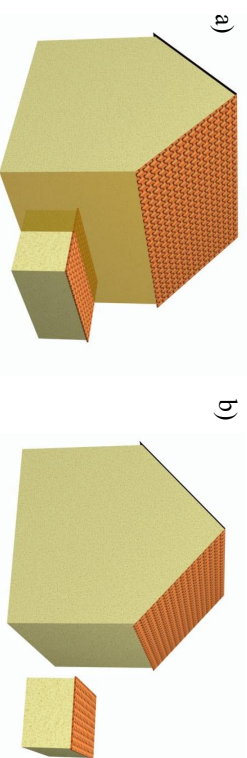


Abb. 7: Inkonsistenzen zwischen zwei Gebäuden (Haus und Garage) aus unterschiedlichen Datensätzen. In der Realität ist das Haus zu der Garage unmittelbar benachbart. In a) kommt es zu einer Durchdringung der beiden Gebäude, und in b) zu einer Kluftung.

Die geschilderten Kluftungen und Durchdringungen können dann auftreten, wenn die beiden betroffenen Volumenkörper bzw. Gebäude auf der Grenze der jeweiligen zusammengeführten Datensätze liegen. Insofern handelt es sich hier um eine zonale Fragmentierung im 3D. Andererseits können dieselben Inkonsistenzen sich auch bei der Zusammenführung zweier Datensätze ereignen, die sich auf dasselbe räumliche Gebiet, aber verschiedene Objektarten beziehen. Ein Beispiel hierzu ist ein Datensatz mit Gebäuden, der mit dem Datensatz mit den zugehörigen Garagen integriert wird. Die Konsequenzen sind in beiden Fällen identisch. Hier liegt jedoch eine Layer-Fragmentierung vor.

4.1.3 Probleme bei der Integration 2,5D mit 3D

Die bisher betrachteten Inkonsistenzen bezogen sich jeweils auf Geoobjekte derselben Dimensionalität. Bei der Integration von Gebäuden und Geländemodellen werden typischerweise 3D- mit 2,5D-Daten zusammengeführt. Wenn die Höhen des DGMs und der Gebäudeunterkanten nicht zueinander passen, tritt entweder der Fall ein, dass Gebäude im Gelände „versinken“ (vgl. Abb. 8a) oder über ihm „schweben“ (vgl. Abb. 8b).

Selbst wenn die Höhen von Gebäuden und DGM zueinander passen, ergibt sich eine Durchdringung des DGMs mit den Gebäuden, sofern das DGM an den Grundrissflächen nicht entsprechend eingebnet ist. Prinzipiell zerteilt das DGM somit betroffene Gebäude in einen ober- und einen unterirdischen Teil.

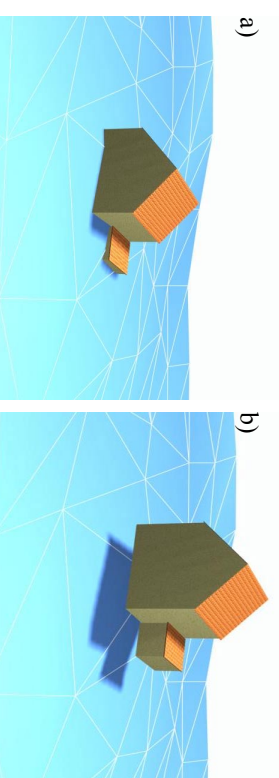


Abb. 8: Inkonsistenzen zwischen Gebäuden und dem DGM. In a) ist das Gebäude im Gelände versunken, während es in b) schwebt.

4.1.4 Zusätzliche Probleme durch multiskalige Repräsentationen

Die in den vorherigen Abschnitten geschilderten Probleme basierten auf der Annahme, dass jedes Realweltobjekt (z.B. Gebäude, Geländeoberfläche) durch genau eine räumliche Repräsentation abgebildet wird. Wenn für ein räumliches Gebiet Objekte verschiedener Skalenbereiche existieren, ergibt sich ein neues Problem räumlicher Inkonsistenz, und zwar das der Mehrfachrepräsentation des Raumes. Wenn beispielsweise ein Gebäude in zwei unterschiedlichen Level-of-Details modelliert wurde, muss für die Arbeit mit dem 3D-Modell (Visualisierung, Analysen etc.) eine eindeutige Entscheidung zwischen den beiden Repräsentationen gefällt werden. Eine räumlich konsistente Darstellung der Realität enthält immer nur eine Repräsentation.

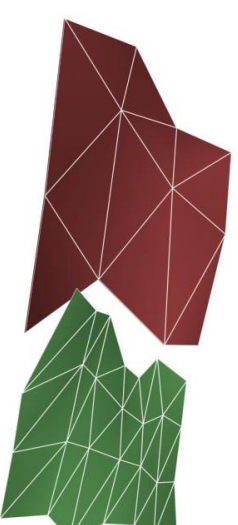


Abb. 9: Inkonsistenz bei der Zusammenführung zweier TINs, die zu unterschiedlichen Level-of-Details gehören. Das linke TIN hat eine wesentlich gröbere Auflösung als das rechte.

Für bestimmte Anwendungen kann es sinnvoll sein, unterschiedliche Geoobjekte jeweils unterschiedlicher Level-of-Details gemischt in einer

Szene zu verwenden. Dabei verschärften sich jedoch die in den vorangegangenen Abschnitten diskutierten Probleme erneut. Dort, wo Geoobjekte unterschiedlichen Detaillierungsgrades aneinander grenzen, kommt es allein aufgrund des differierenden Generalisierungsgrades zu Fehlern. Abb. 9 zeigt beispielhaft die Probleme bei der Integration zweier TINs verschiedener Granularität.

4.2 Probleme durch Geodateninfrastrukturen

Geodateninfrastrukturen zeichnen sich durch verteilte Dienste und Datenhaltung aus. Daraus folgt, dass die Kontrolle über eine gemeinsame Datenlage nicht wie im Fall lokaler Datenbanken einer verantwortlichen Instanz obliegt, sondern im Regelfall von den einzelnen Daten- und Dienst Providern ausgeübt wird.

Die in den vorhergehenden Abschnitten dargestellten Probleme der Integration von raumbezogenen Datensätzen ließen sich innerhalb einer lokalen Datenbank durch ggfs. manuelle Korrekturen beheben. Aufgrund der fehlenden Herrschaft über die Daten wäre dies in einer GDI nicht so ohne weiteres möglich, so dass die Frage zu stellen ist, wie eine konsistente Datenlage hergestellt und gewährleistet werden kann.

In einer GDI geschieht eine Fortführung von Daten im Zweifelsfall ohne Benachrichtigung der Nutzer. Das bedeutet, dass Nutzer jederzeit damit rechnen müssen, dass durch unkoordinierte Veränderungen von Daten einzelner Provider die Konsistenz gefährdet ist. Angenommen, in einem Szenario werden Gebäude des Anbieters A zusammen mit dem DGM des Anbieters B verarbeitet. Zur Schaffung einer konsistenten Datenlage hat A die Gebäude auf Basis des DGMs von B erstellt. Wenn nun B das DGM durch ein genaueres oder anders interpoliertes ersetzt, besteht die Gefahr, dass die Gebäudeunterkanten nicht mehr konsistent zu dem neuen DGM sind.

4.3 Ansätze zur Erkennung und Beseitigung von Inkonsistenzen

Das Problem der effizienten *Aufdeckung* geometrisch-topologischer Inkonsistenzen ist im Zweidimensionalen weitgehend gelöst (z.B. LAURINI UND MILLERET-RAFFORT, 1991; MOLENAAR, 1998; PLÜMER UND GRÖGER, 1997; GRÖGER 2000). Eine Ausdehnung dieser Arbeiten auf den dreidimensionalen Fall hat bisher allerdings nicht stattgefunden. Weitans schwieriger als die Aufdeckung ist das Problem der automatischen *Behbung* dieser Inkonsistenzen. Hier existieren nur wenige, auf den zweidimensionalen Fall beschränkte Ansätze. LAURINI (1998) beschreibt z. B. im Kontext der Behbung zentraler Fragmentierungen ein Verfahren, das innerhalb eines Puffers um die gemeinsame Grenze korrespondierende

Punktepaare durch Transformationen „aufeinander zieht“. Die automatische Identifikation der beiden sich jeweils Entsprechenden Punkte wird jedoch als bisher ungelöstes Problem herausgestellt.

Auch pragmatische Ansätze, wie zum Beispiel die Lösung des Problems schwebender Gebäude durch Verlängerung nach unten, bis das DGM durchstoßen wird, sind eher fragwürdig. Zum Zwecke der Visualisierung kann dieses Vorgehen ausreichend sein. Bei Analysen, wie etwa der Berechnung des Volumens umbauten Raumes, zeigen sich jedoch gravierende Nachteile, da das Volumen von 3D-Geoobjekten somit von der konkreten Ausprägung des DGMs abhängt.

Neben diesen eher konzeptionellen Schwierigkeiten treten im Kontext einer Geodateninfrastruktur und der damit verbundenen verteilten Datenhaltung die bereits im vorherigen Abschnitt geschilderten Probleme auf. Ein Lösungsansatz auf der Architekturebene ist die Spezifikation von Diensten, die die Aufgabe der Datenintegration übernehmen. Hier sind zwei Optionen denkbar: Zum einen können spezielle Interoperabilitätsdienste in die Dienstekette zwischen den datenliefernden Feature-Servern und vor den Visualisierungs- oder Analysediensten eingebunden werden. Alternativ kann die Interoperabilitäts-Funktionalität in andere Dienste, etwa einen Visualisierungsdienst, integriert werden.

Den Problemen durch verteilte Datenhaltung kann zum einen durch Benachrichtigungsdienste und zum anderen durch ein Versionsmanagement begegnet werden. Benachrichtigungsdienste setzen Nutzer davon in Kenntnis, dass von ihnen genutzte Geodaten verändert wurden. Sofern alle verwendeten Dienste die vollständige Historienverwaltung ihrer Daten realisieren, kann die Konsistenz gewährleistet werden, indem bei allen Bezügen auf Daten anderer explizit deren Version (Zeitpunkt) angegeben wird.

5 SCHLUSSBEMERKUNGEN

Durch die Entwicklung eines gemeinsamen Basismodells für 3D-Stadtmodelle und dessen Abbildung auf offene Standards zum Austausch von Geodaten (GML3) ist ein erster Schritt zum Aufbau interoperabler 3D-Geodateninfrastrukturen vollzogen. Das Basismodell stellt die Primitive und Mechanismen zur anwendungsspezifischen Modellierung von 3D-Objekten zur Verfügung.

Durch die Einigung auf und Spezifikation der fünf Detaillierungsgrade (Level-of-Detail) ist der Ausgangspunkt für die spezifische Anwendungsmodellierung im Bereich der 3D-Stadtmodelle gelegt. Hier wird es künftige

darum gehen, in Absprache zwischen privaten und öffentlichen Anbietern und Dienstleistern gemeinsam konkrete Anwendungsmodellierungen für die jeweiligen Detaillierungsgrade zu erarbeiten.

Der Artikel hat daneben eine Vielzahl offener Probleme aufgezeigt, die für das Erreichen der vollen Interoperabilität gelöst werden müssen. Zum einen ist das Basismodell um die Berücksichtigung von mehrskaligen Repräsentationen zu ergänzen. Dabei muss insbesondere das Verhältnis der räumlichen Mehrfachrepräsentationen zueinander geklärt werden. Zum anderen sind bislang nur oberirdische Geoobjekte modelliert. Unterirdische Strukturen wie z.B. Tunnel, Passagen und Unterführungen sind entsprechend einzubeziehen. Das spezifische Problem ist dabei die Schnittstelle von ober- und unterirdischen Objekten.

Weitere Herausforderungen stellen Verfahren zur automatischen Aufdeckung und Behebung von Inkonsistenzen für 3D-Geoobjekte dar. Insbesondere ist dabei die Wahrung der Konsistenz bei Fortführungen im Kontext der Dienste-Architektur zu berücksichtigen.

DANKSAGUNG

Die gezeigten Ergebnisse wurden z.T. im Rahmen der SIG 3D der Initiativen Geodateninfrastruktur NRW erarbeitet. Wir danken allen Mitwirkenden, insbes. der AG Basismodellierung. Weitere Ergebnisse sind im Rahmen einer Studie für die Stadt Wuppertal entstanden, die gemeinsam mit Lutz Plümer, Wolfgang Förstner und Ansgar Brunn (Universität Bonn) angefertigt wurde. Für Diskussionen und Unterstützung bei der Erstellung des Artikels bedanken wir uns bei Daniela Schulz, Ingo Petzold und Viktor Stroh.

LITERATUR

- ADV (2002): Dokum. zur Modellierung der Geoinformationen des amtlichen Vermessungswesens (GeolInfoDok). <http://www.adv-online.de>
- Bishr, Y. (1998): Overcoming the semantic and other barriers to GIS interoperability. *Int. Journal on Geogr. Information Science*, Vol. 12, No. 4.
- Cox, S., Daisy, P., Lake, R., Portele, C., Whiteside, A. (2003): OpenGIS Geography Markup Language (GML 3). Implementation Specification Version 3.00, OGC Document Number 02-023r4.
- Foley, J., van Dam, A., Feiner, S., Hughes, J. (1995): *Computer Graphics: Principles and Practice*. Addison Wesley Longman, 2. Auflage.

Gröger, G. (2000): *Modellierung raumbezogener Objekte und Datenintegrität in GIS*. Wichmann Verlag, Heidelberg.

Herring, J. (2001): The OpenGIS Abstract Specification, Topic 1: Feature Geometry (ISO 19107 Spatial Schema), Version5. OGC Doc.No. 01-101.

IAI (2002): Industry Foundation Classes IFC 2.X Model Implementation Guide, Version 1.4. International Alliance for Interoperability <http://www.iai-international.org>

Köninger, A., Bartel, S. (1998): 3D-GIS for Urban Purposes. *Geoinformatica*, Vol. 1, No. 1.

Kolbe, T. H. (2003): Interoperable Modelle, *GeoBIT* 5/2003.

LVermA NRW (2002): GeoBasis.NRW – Umsetzung des ALKIS/ ATKIS/ AFIS-Standards in NRW. <http://www.lverma.nrw.de>

Laurini, R. (1998): Spatial multi-database topological continuity and indexing: a step towards seamless GIS data interoperability. *Int. Journal on Geographical Information Science*, Vol. 12, No. 4.

Laurini, R., Milleret-Raffort, F. (1991): Using Integrity Constraints for Checking Consistency of Spatial Databases. In *GIS/LIS'91 Proceedings*, Vol. 2. ACSM, ASPRS, AAG,URISA, AM/FM.

Molenaar, M. (1998): *An Introduction to the Theory of Spatial Object Modelling*. Taylor & Francis.

Percival, G. (2002): The OpenGIS Abstract Specification, Topic 12: OpenGIS Service Architecture, Version 4.3. OGC Doc. No. 02-112.

Plümer, L., Gröger, G. (1997): Achieving Integrity in Geographic Information Systems: Maps and Nested Maps. *Geoinformatica*, 1(4):354-376.

Senkler, K. (2001): Anforderungen an eine offene Infrastruktur für E-Business und Geoinformations-Services. In: Strobl/Blaschke/Griesebner (Hrsg.) *Beiträge z. AGIT-Symposium Salzburg 2001*, Wichmann Verlag.

Singh, R. (2001): Open GIS Web Terrain Server (WTS), Version 0.3.2. OGC Document Number 01-061.

Voges, U., Renke, A., Bernard, L. (2002): Kommunikation ist angesagt – Finden und Binden von Services in einer Geodateninfrastruktur. *GeoBit* 11/2002.

Zipf, A., Schilling, A. (2002): Dynamische Generierung von VR-Stadtmodellen aus 2D und 3D-Geodaten für Tourenanimationen. *GIS* 6/2002.

W3C (2003) Scalable Vector Graphics (SVG) 1.1 Specification, W3C Recommendation, 14 January 2003, <http://www.w3.org/TR/SVG>