

Modellierung einer Geodatenchnittstelle zur semantisch basierten Geodatenintegration von CityGML-Modellen

ROBERT KADEN, THOMAS H. KOLBE

Zusammenfassung: Virtuelle 3D-Stadtmodelle sind komplexe Kompositionen aus Geodaten unterschiedlicher Thematik, Herkunft, Qualität, Skalen und Dimensionen. Bei der Integration dieser Geodaten treten in der Regel räumliche Inkonsistenzen zwischen den Geometrien der Objekte auf, welche auf die getrennte Erfassung und Fortführung der Daten zurückzuführen sind. Das Zusammenführen dieser fragmentierten Informationen zu einem konsistenten Gesamtmodell ist aufgrund der Komplexität der zu beachtenden strukturellen, semantischen und geometrischen Vereinbarkeiten äußerst vielschichtig und bislang nicht umfassend gelöst. Geometrische Inkonsistenzen werden in Form von Klaffungen oder Durchdringungen zwischen den in der realen Welt räumlich koinzidierenden Objekten bzw. Objektteilen sichtbar. Neben den visuellen Effekten können Modellinkonsistenzen zu falschen Ergebnissen bei der analytischen Verarbeitung des virtuellen 3D-Stadtmodells, z.B. im Katastrophenschutz, führen. Die räumliche Unvereinbarkeit von Modellen verschiedener Anbieter stellt zudem eine wesentliche Ursache für die bislang zögerliche Etablierung eines regen Geodatenmarktes und der Geodateninfrastrukturen dar und führt in der Regel zu einem hohen Kosten- und Zeitaufwand aufgrund von manuellen Nachbereitungen. Ziel unserer Arbeiten ist es, auf CityGML-basierende semantische 3D-Stadtmodelle verschiedener thematischer Inhalte und Herkünfte ad-hoc und automatisiert zu integrieren und dabei ein konsistentes Gesamtmodell zu erzeugen. Im Gegensatz zu anderen Arbeiten zur Geodatenintegration, die sich mit der Zusammenführung von Daten unterschiedlicher Datenmodelle und Ontologien befassen, wird in diesem Beitrag das Problem der Integration komplexer 3D-Modelle gleicher Repräsentation (hier: CityGML) in Bezug auf Homogenisierung und geometrisch-topologisch konsistente Verknüpfung untersucht. Dazu wird ein Konzept zur Modellierung einer Geodatenchnittstelle sowie eines Integrationsalgorithmus zur semantisch basierten Integration von Geodaten vorgestellt.

1 Einführung

Der Bedarf an Geoinformationen ist nicht zuletzt durch die Etablierung von Massenanwendungen, wie Google Maps, Bing Maps, etc., in den letzten Jahren stark angestiegen. Immer mehr Anwendungen beschränken sich nicht nur auf die Visualisierung einzelner Geodatenätze, sondern ermöglichen durch eine Steigerung des Informationsgehaltes von ortsbezogenen Daten komplexere Anwendungen. Diese Informationsgewinnung wird u.a. durch die Integration von Geodaten unterschiedlicher Thematik, Herkunft, Qualität, Skalen und Dimensionen erreicht, um komplexe Geodatenkompositionen wie z.B. virtuelle 3D Stadtmodelle zu erzeugen. Zur Konservierung der thematischen Informationen werden vermehrt semantische Datenmodelle zur Speicherung und zum Austausch dieser Daten genutzt.

Die Etablierung komplexer Geodatenanwendungen erfordert eine strukturell, räumlich und semantisch konsistente Datenbasis. In diesem Zusammenhang besteht die Notwendigkeit, dass Geodaten nach dem *Plug&Play*-Prinzip ad-hoc integrierbar zur Verfügung stehen und ohne manuelle Nachbereitungen ein konsistentes Gesamtmodell erzeugen. Bislang wird dieser Anspruch

nicht erfüllt, wodurch der in der Vergangenheit prognostizierte Geodatenmarkt nicht im vorausgesagten Maße entstehen konnte [Micus, 2001; 2003]. Zwar existieren Geodateninfrastrukturen, welche u.a. auf Standards zur strukturellen und semantischen Vereinbarkeit der Daten basieren, jedoch existieren immer noch Schwierigkeiten bei der geometrischen Vereinbarkeit der Geodaten, um ad-hoc nutzbare Gesamtmodelle in Hinblick auf ihre geometrisch-topologische Konsistenz zu erzeugen.

Eine Machbarkeitsstudie der Universität Bonn [Plümer et al., 2006], zur Umsetzung der EU-Umgebungslärmrichtlinien in Nordrhein-Westfalen, macht deutlich, dass der größte Anteil der Zeit für die Bereitstellung, Aufbereitung und Integration von Sach- und Geometriedaten verwendet wurde (ca. 90 %), im Gegensatz zu einem kleinen Teil für die eigentliche Lärmberechnung und Lärmkartenerstellung. Einen besonders hohen Anteil haben die Aufwendungen für die Homogenisierung und Aufbereitung von Geometriedaten (ca. 30 %) [Plümer et al., 2006].

2 Motivation

Gerade im Bereich des Katastrophenschutzes ist es im Fall eines Unglückes häufig erforderlich, zügig auf ereignisrelevante Geodaten zugreifen zu können und diese zusammenzufügen. Auf dieser Grundlage können Simulationen durchgeführt und geeignete Schutz- und Rettungsmaßnahmen eingeleitet werden. Einsatzgebiete sind dabei Flutsimulationen, Brandsimulationen, das Erkennen von provisorischen Rettungs- und Transportwegen usw. Der Bedarf an konsistenten Geodaten wird mittlerweile auch auf politischer Ebene, durch das Europäische Gesetz zur Lärmemissionsminderung, bestärkt. Durch den § 47a Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) sind die Kommunen und Länder der Bundesrepublik dazu verpflichtet, Maßnahmen zur Lärminderung in bewohnten Gebieten zu veranlassen [Czerwinski et al., 2006]. Es soll ermittelt werden, welche Regionen im besonderen Maße von Lärmimmissionen betroffen sind. Auf der Grundlage von virtuellen 3D-Stadtmodellen werden Lärmausbreitungssimulationen durchgeführt und Lärminderungskarten erzeugt. Für eine zielführende Analyse muss das virtuelle 3D Stadtmodell sämtliche thematische Objekte mit Einfluss auf die Lärmerzeugung sowie -ausbreitung beinhalten, beispielsweise ein Geländemodell, Verkehrsflächenmodell und Gebäudemodell. Durch das BImSchG werden Geodatenintegrationen im großen Umfang notwendig, was jedoch durch die mangelnde geometrische Konsistenz der Daten bislang nur unter großen personellen und finanziellen Aufwand möglich. Zusätzlich hängt die Qualität der Simulationen und Analysen von der geometrischen und semantischen Konsistenz der Modelle ab.

In den Anwendungsgebieten der Stadtplanung, des Tourismus und der Wirtschaftsförderung spielt die Visualisierung eine vornehmliche Rolle. Virtuelle Szenen ersetzen Holz- und Pappmodelle und unterstützen die Planungsprozesse bezüglich der Gestaltung zukünftiger Objekte. Verschiedene Varianten der Planung können so unproblematisch erzeugt und zur Begutachtung bereitgestellt werden. Im Bereich der Wirtschaftsförderung sowie des Tourismus spielt neben der Visualisierung der Gebäude auch die Darstellung der Infrastruktur eine entscheidende Rolle, welche zu diesem Zweck integriert werden muss [AG 3D-Stadtmodelle, 2004]. Im Bereich der Fahrzeug- und Fußgängernavigation kommen vermehrt integrierte dreidimensionale Modelle zur Anwendung. Unternehmen wie Google oder Microsoft kaufen Geodaten für ihre Anwendungen

Google Earth, *Google Maps* und *Microsoft Virtual Earth* bei dem günstigsten Anbieter am Markt und erheben sich dabei in die dritte Dimension [Kolbe & Bacharach, 2006].

Durch die steigende Kommerzialisierung der Geodaten als „Handelsware“ entstehen auch Veränderungen am Anbietermarkt. Während es in der Vergangenheit fast ausschließlich Aufgabe der Öffentlichen Hand war, Geodaten im großen Umfang zu erheben, zu verarbeiten und zu verbreiten, sehen zunehmend privatwirtschaftliche Unternehmen ein Geschäftsfeld in der Erhebung solcher Daten, zum einen zur Nutzung in eigenen Anwendungen und zum anderen, um sie am Markt anzubieten. Dieser Zustand führt zu einer schwer kontrollierbaren Fragmentierung der Geodaten, das heißt, innerhalb einer Behörde oder Unternehmen werden Geodaten in der Regel strukturell und räumlich konsistent geführt, anbieterübergreifend ist dies jedoch bislang kaum möglich. Die Erweiterung des Anbietermarktes führt darüber hinaus zu einer steigenden Datenerfassungsrate, was durch die Nutzung moderner automatischer Geodatenerfassungssysteme und Objekt-Rekonstruktionsverfahren begünstigt wird.

Die zunehmende Etablierung von Anwendungen, die steigende Nachfrage der Nutzer und die Erweiterung des Anbietermarktes fordern einen funktionierenden Geodatenmarkt mit integrierbaren Geodaten, nicht nur auf struktureller und semantischer sondern auch auf räumlicher Ebene. Das vorgestellte Konzept zielt auf die Lösung dieser Problematik ab, mit dem Ziel, eine effektive Nutzung von Geodaten zu ermöglichen und somit die Verbreitung des Geodatenmarktes in Form der Geodateninfrastrukturen voran zu treiben.

3 Stand der Forschung

Analytische und simulierende Anwendungen benötigen, über die reine geometrische Repräsentation von urbanen Strukturen hinaus, „intelligenter“ virtuelle Stadtmodelle. Analysen zur Flutsimulation, Lärmausbreitung und Luftverschmutzung beispielsweise beziehen unterschiedliche, thematisch relevante Objekte und Parameter des Betrachtungsraumes in die Berechnungen ein. Semantische Stadtmodelle, welche zur Durchführung dieser Analysen genutzt werden, beinhalten diese Objekte und Parameter des Betrachtungsraumes in Form einer Ontologie. Im August 2008 veröffentlichte das OGC den „OpenGIS City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard“ in der Version 1.0.0, der SIG 3D [Open Geospatial Consortium, 2008]. CityGML versteht sich als ein semantisches Datenmodell zur applikationsübergreifenden Repräsentation und zum Austausch von 3D-Stadtmodellen. CityGML ist ein XML-basiertes Speicherformat und ist als Anwendungsschema der *Geography Markup Language 3* (GML3) implementiert. CityGML umfasst eine gemeinsame Definition von grundlegenden Objektklassen, Attributen und Relationen im Sinne der Ontologie von 3D-Stadtmodellen im Bezug auf geometrische, topologische, semantische und visuelle Eigenschaften [Kolbe, 2008].

Die Anwendung eines semantischen Datenmodells zur Speicherung von Geodaten fördert eine konsistente Datenintegration, da auf dessen Grundlage Aussagen über die Bedeutung der Objekte getroffen werden können und somit implizit vorhandene geometrische Zusammenhänge zwischen Objekten unterschiedlicher Modelle ableitbar sind. Diese Zusammenhänge lassen sich durch Regeln bzw. Bedingungen formulieren und bilden die Basis für einen semantisch und räumlich konsistenten Integrationsprozess. Stadler und Kolbe [2007] beschreiben diese Vorteile des semantisch aufgelösten Modells für die Integration, unter der strikten Einhaltung der Kohä-

renz zwischen der Semantik und der Geometrie. Innerhalb des semantischen Datenmodells von CityGML wurde bereits ein erstes Konzept zur Integration von Stadtobjekten mit einem digitalen Geländemodell umgesetzt. Die *Terrain Intersection Curve* beschreibt durch eine Liniengeometrie die Anschlussstelle zwischen Gebäuden oder Stadtobjekten und der Geländeoberfläche und ermöglicht somit ein Stadtmodell mit Konsistenz zwischen diesen Klassen [OGC 08-007r1, 2008]. Emgard und Zlatanova [2007a, 2007b] präsentieren eine erste Erweiterung des semantischen Konzeptes und Informationsmodells von CityGML, um Zusammenhänge zwischen unterschiedlich dimensionalen Objekten und dem Geländemodell zu beschreiben.

Bei der Integration von Geodaten entstehen je nach Datengrundlage und Zielsetzung ganz unterschiedliche Problemstellungen. Sester [2007] fasst die Besonderheiten bei der Integration von zweidimensionalen Daten unterschiedlicher Herkunft und Modellierung zusammen und beschreibt Ergebnisse aktueller Arbeiten. Eine Voraussetzung für die Interoperabilität dieser Daten ist, dass strukturelle, semantische und geometrische Unterschiede zwischen den Daten beachtet werden müssen. Strukturelle Interoperabilität wird durch die mittlerweile etablierten Standards der *International Organisation for Standardisation* (ISO) sowie des *Open Geospatial Consortium* (OGC) erreicht. Nach Sester [2007] sind die unterschiedlichen Repräsentationsweisen und Inhalte und somit die semantischen Unterschiede problematischer. Für eine sinnvolle Integration muss die Semantik der Inhalte vergleichbar gemacht werden. Handelt es sich in einem Datensatz bspw. um einen „See“ und in einem anderen Datensatz wird die Bezeichnung „Teich“ verwendet, kann die Gleichheit der Objektart nur durch eine semantische Betrachtung erkannt werden [Sester, 2007]. Für eine automatische Integration ist es notwendig, die semantische Korrespondenz zwischen zwei Modellen zu ermitteln. Der u.a. von Sester [2007] sowie von Duckham & Worboys [2005] und Volz [2006] verwendete Ansatz basiert auf dem Grundgedanken, dass Objekte, die sich an der gleichen Stelle im Raum befinden und ähnliche geometrische Strukturen aufweisen, eine semantische Beziehung besitzen.

Die semantische Korrespondenz von Objekten kann durch die Verwendung eines standardisierten semantischen Datenmodells hergestellt werden. Zwar können herstellerbedingt durch unterschiedliche Interpretationen der Bedeutung von Objekten unterschiedliche semantische Auflösungen oder Klassen zur Anwendung kommen, jedoch ist die Varianz durch das semantische Datenmodell des verwendeten Standards stark begrenzt.

Kampshoff [2005a] präsentiert mathematische Algorithmen zur geodätischen Homogenisierung von Geometrien auf der Basis der erkannten korrespondierenden Objekte sowie [2005b] die komplette Integration heterogener raumbezogener Objekte aus fragmentierten Geodatenbeständen. Das Projektes „GiMoDig“ der Europäischen Union befasste sich mit der Umsetzung einer on-the-fly Harmonisierung und Generalisierung der topographischen Daten in Europa [Sarjakoski & Sarjakoski, 2005].

Aus der implizit vorhandenen Semantik von Objekten lassen sich geometrische Zusammenhänge auch zwischen nicht korrespondierender Objekte und Objekte unterschiedlicher Thematik ableiten. Basierend auf diesem Gedanken beschreibt Koch [2006] die Integration von zweidimensionalen GIS-Daten mit einem digitalen Geländemodell, z.B. die Verschneidung von Wasser- oder Verkehrsflächen mit einem DGM. Aus der Semantik der Objekte lassen sich Integrationsregeln und -gesetze ableiten, welche in einen Ausgleichsprozess einfließen und im Ergebnis ein

semantisch konsistentes Gesamtmodell liefern, indem Wasserflächen horizontal sind und Straßen eine gewisse Neigung nicht überschreiten [Koch, 2006].

Ist die semantische Korrespondenz zwischen Objekten hergestellt, bleiben die geometrischen Unterschiede. Geometrische Unterschiede zwischen Geodaten werden u.a. in Kampshoff [2005b] untersucht und beruhen zum einen auf der absoluten Genauigkeit der Geometrie der Objekte und zum anderen auf möglichen unterschiedlichen Referenzsystemen. Kampshoff und Benning [2005] beschreiben die geometrische „Homogenisierung von Massendaten im Kontext von Geodateninfrastrukturen“. Es wird ein geodätisches Verfahren zur Homogenisierung vorgestellt und der Zusammenhang zu den aus der Geoinformatik stammenden Ansätzen der Integration und Verschmelzung aufgezeigt. Es wird gezeigt, dass das Verfahren der Homogenisierung die Integration geometrisch inkonsistenter Datenquellen ermöglicht und dadurch für die Herstellung der geometrischen Interoperabilität in Geodateninfrastrukturen nutzbar ist.

4 Konzept zur semantisch basierten Integration

In diesem Beitrag wird ein Konzept zur Integration von Geodaten unterschiedlicher Thematik, Herkunft, Qualität, Skalen und Dimensionen, jedoch gleicher Repräsentation, vorgestellt. Das Konzept beinhaltet eine Erweiterung des international etablierten Standards CityGML zur semantisch basierten Integration dieser Modelle nach dem *Plug&Play*-Prinzip. Inkonsistenzen in Form von Klaffungen und Durchdringungen zwischen den in der realen Welt koinzidierenden Objekten sollen automatisch ermittelt und beseitigt werden. Integrierte Modelle sollen ad-hoc ein konsistentes Abbild der realen Welt ergeben, wobei topologische Zusammenhänge zwischen Objekten durch Verbesserung der Objektgeometrie hergestellt werden und mit einer größtmöglichen Genauigkeit im Rahmen der gegebenen Genauigkeiten der Ausgangsmodelle.

4.1 Semantisch basiertes Matching

Ein entscheidender Bestandteil der geometrischen Harmonisierung ist das Matching von homologen Objekten bzw. von koinzidierenden Teilgeometrien benachbarter Objekte. Durch die modellübergreifende Verknüpfung dieser Objekte werden die auftretenden Inkonsistenzen zwischen den integrierten Modellen ermittelt. Gerade bei der Verknüpfung von nicht identischen Objekten, z.B. der Anschluss eines Weges entlang einer Gebäudeseite, kann die tatsächliche Verbindung dieser Objekte nicht allein aufgrund einer statistischen Untersuchung erfolgen, wie es bei homologen Objekten der Fall ist (z.B. Chi-Quadrat-Test). Beispielsweise kann eine zwischen einem Gebäudemodell und einem Verkehrsflächenmodell bestehende Lücke eine geometrische Inkonsistenz der Modelle beschreiben oder tatsächlich in Form eines schmalen Grünstreifens oder Kiesbett zwischen den Objekten bestehen.

Im vorgestellten Konzept wird dieser herrschende Informationsmangel durch die Modellierung einer Geodatenschnittstelle ausgeglichen. Die Geodatenschnittstelle bietet die Möglichkeit, Objekte mit Informationen anzureichern, welche die Verknüpfung zusammenhängender Objekte beschreiben und dem Integrationsalgorithmus zur Verfügung stehen. Diese Verknüpfungsinformationen sind bei der Modellierung von Objekten häufig bekannt bzw. aus der Datengrundlage leicht ableitbar, jedoch werden sie bislang nicht berücksichtigt. Die Ursache dafür ist die getrennte thematische Erfassung und Modellierung der Geodaten, sowie das in semantischen

Datenmodellen bislang keine standardisierten Möglichkeiten zur Speicherung dieser objektbezogenen Informationen vorgesehen sind. Die Bereitstellung von Anschlussinformationen für den Integrationsprozess ermöglicht eine explizite Verknüpfung nicht homologer Objekte, wodurch Modellinkonsistenzen aufgedeckt und beseitigt werden können. Abbildung 1 zeigt die Informationen welche dem Gebäudemodell angefügt werden können, um die Verbindung zu einem anderen Objekt zu beschreiben. Zusätzlich beinhaltet die Schnittstelle objektbezogene Informationen, welche die Objektgenauigkeiten und die objektgeometrischen Bedingungen umfassen (vgl. Abbildung 1).

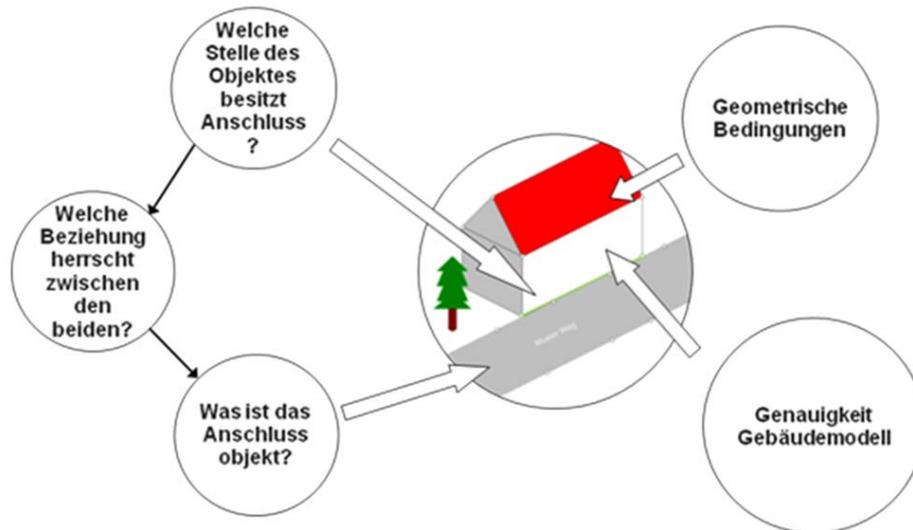


Abbildung 1: Schnittstelleninformationen für das Gebäudemodell zur Beschreibung des Anschlusses an ein Verkehrsflächenobjekt und zur Steuerung des Integrationsprozesses

Ein Matchingalgorithmus stellt auf der Grundlage der Informationen der modellierten Geodaten-schnittstellen Verknüpfungen her. Er hat die Aufgabe, die objektseitigen Schnittstellen zu erkennen und durch die Anwendung eines Matchingschemas die Verknüpfungen herzustellen. Das Matchingschema wird als dynamische Komponente des Integrationsalgorithmus die Verknüpfungsregeln und -algorithmen festlegen, welche nutzer- bzw. datenbezogen angepasst werden können. Diese Anpassungen basieren auf Grundlage von Wissen um die Herkunft, die Qualität und die semantischen und geometrischen Modellierungseigenheiten der Modelle. Nach der Verknüpfung der Objekte werden die Inkonsistenzen in Form von Inkonsistenzvektoren zwischen den Anschlussstellen ermittelt. Eine Anzahl von Inkonsistenzvektoren wird an zufällig verteilten Stellen berechnet, um unterschiedliche Abstände über die gesamte Anschlussstelle zu ermitteln. Das Beispiel in Abbildung 2a zeigt ein Gebäudemodell mit einem Verkehrsflächenmodell, wobei der Weg in der realen Welt am Gebäude anschließt. Im konstruierten Fall gibt die Schnittstelle des Gebäudes an, dass eine Gebäudeseite Anschluss an ein Verkehrsflächenobjekt besitzt. Das Anschlussobjekt soll nun aus allen Verkehrsflächenobjekten des Verkehrsflächenmodells durch statistische Testverfahren unter der Einhaltung der im Matchingschema festgelegten Kriterien

ermittelt werden. Im Anschluss erfolgt die Berechnung der Inkonsistenzvektoren an zufällig verteilten Positionen, über die linienhaften Anschlussstellen.

Das zweite Beispiel in Abbildung 2b zeigt ein Gebäudemodell mit einem weiteren Gebäudemodell, welche in der realen Welt topologisch verbunden sind. Das Beispiel zeigt eine Aktualisierung des Gebäudebestandes um eine nachträglich errichtete, vermessene und modellierte Garage. Aufgrund der getrennten Erfassung der Objekte weisen die eigentlich koinzidierenden Wandflächen Inkonsistenzen in Form einer Klaffung auf. Im Beispiel gibt die Schnittstelle der Garage an, dass Anschluss einer Garagenseite zu einem Gebäude besteht. Wie im vorangegangenen Beispiel wird das Anschlussobjekt aus allen Gebäudeobjekten des Gebäudemodells ermittelt und die Inkonsistenzvektoren berechnet.

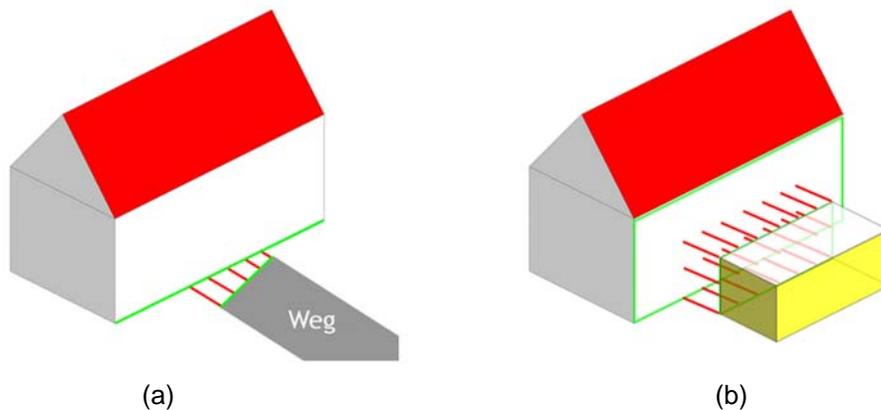


Abbildung 2: Beispiele für geometrische Inkonsistenzen mit hergestellter Verknüpfung und berechneten Inkonsistenzvektoren

4.2 Interpretation der erkannten Inkonsistenzen aus dem Matching-Prozess und Eliminierung der systematischen Anteile

Inkonsistenzen zwischen den Objekten der Modelle bestehen aus einem global systematischen, einem lokal systematischen und einem zufälligen Anteil [Kampshoff und Benning, 2005]. Durch eine Interpretation der Inkonsistenzvektoren aller Objekte über die gesamte Ausdehnung der Modelle kann ein vorhandener systematischer Anteil aufgedeckt werden. Lässt sich eine Systematik über die einzelnen Inkonsistenzvektoren ermitteln, werden der Betrag der Verschiebung und die Richtung des systematischen Fehlervektors der beiden Modelle zueinander ermittelt (vgl. Abbildung 3a). Diese Analyse ist jedoch nicht trivial, da Inkonsistenzvektoren nicht zwischen Verknüpften Punkten sondern zwischen zusammenfallenden Linien oder Flächen ermittelt werden, z.B. zwischen Gebäude und Gehweg. Die Beträge der Inkonsistenzvektoren der verknüpften Objekte sind somit abhängig von deren Orientierung zur Richtung des Inkonsistenzvektors der beiden Modelle zueinander.

Modellübergreifende systematische Inkonsistenzen werden durch die Anwendung der Ähnlichkeitstransformation auf die gesamten Ausgangsmodelle eliminiert (vgl. Abbildung 3b). Beide Modelle werden auf der Spur des ermittelten Inkonsistenzvektors aufeinander zu bewegt und in ein gemeinsames Zielsystem transformiert. Die Position des gemeinsamen Zielsystems soll

durch die Gewichtung der Ausgangspositionen, auf der Grundlage der angegebenen Genauigkeit der Ausgangsmodelle, errechnet werden.

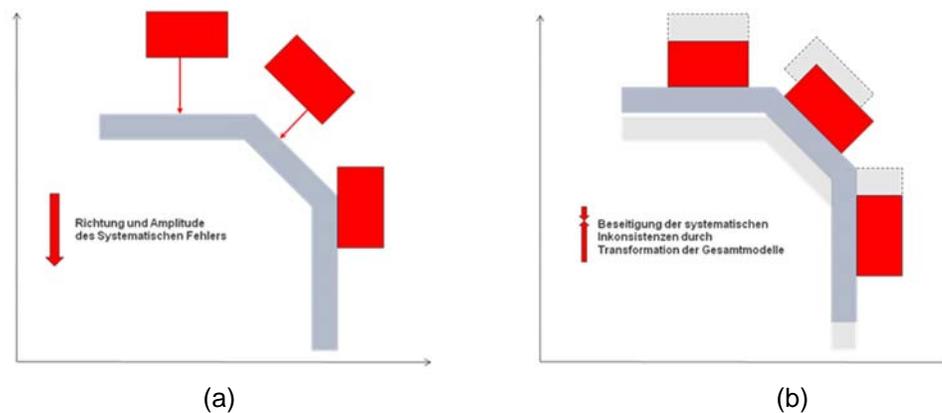


Abbildung 3: (a) Systematischer Anteil der geometrischen Inkonsistenz zwischen einem Gebäudemodell und einem Verkehrsflächenmodell mit einer Richtung von „180°“ und einer Amplitude „x“ (b) Transformation des Gebäudemodells und des Verkehrsflächenmodells auf der Spur des modellübergreifenden Inkonsistenzvektors aufeinander zu

4.3 Objektgeometrische Verbesserung der zufällig verteilten Inkonsistenzen

Typischerweise verbleiben nach einer überbestimmten Transformation Restklaffen an den Verknüpfungsstellen, welche auf die zufällig verteilten Messfehler der Objekte zurück zu führen ist. Die zufällig verteilten Inkonsistenzen werden im Anschluss durch ein Homogenisierungsverfahren nach der Ausgleichungsmethode der kleinsten Quadrate beseitigt. Die zu verbessernden Restklaffen beziehen sich primär auf die Teilgeometrien der Objekte welche miteinander verknüpft wurden. Eine Veränderung dieser Teilgeometrien der Objekte zur Beseitigung der Inkonsistenzen hat jedoch einen Einfluss auf die inneren objektgeometrischen Zusammenhänge sowie die streckenabhängige Korrelation der Objekte innerhalb eines Modells. Die geometrische Verbesserung soll daher unter Berücksichtigung bzw. Wahrung dieser Zusammenhänge erfolgen, was unter dem Begriff „Nachbarschaftstreue Anpassung“ verstanden wird, wobei Punktverschiebungen infolge geometrischer Bedingungen nachbarschaftstreu verteilt werden.

Im ersten Beispiel (vgl. Abbildung 4) muss nun das Gebäudemodell und das Verkehrsflächenmodell geometrisch verändert werden, um die Klaffung zwischen den Modellen zu schließen. Die objektgeometrischen Bedingungen für das Gebäudemodell sollten die Wahrung der Winkeligkeit und Strecken umfassen und dadurch eine Verformung verhindern. Das Verkehrsflächenobjekt kann aufgrund der ungenauen Datengrundlage verformt werden. Die Winkeligkeit und Streckenverhältnisse werden nicht bewahrt, sodass im Integrationsergebnis die Inkonsistenz zwischen den nicht parallel verlaufenden Anschlussstellen vollständig beseitigt werden kann.

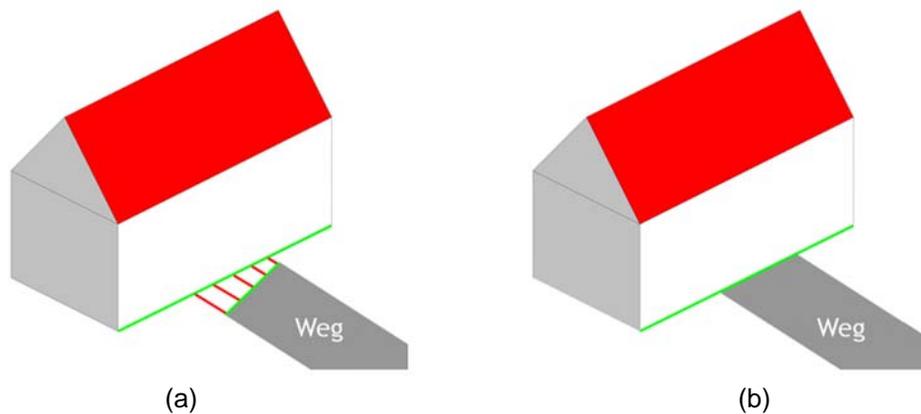


Abbildung 4: (a) Inkonsistenzvektoren vor der geometrischen Verbesserung (b) beseitigte Inkonsistenz durch Bewegung des Gebäudemodells und Bewegung und Verformung des Verkehrsflächenmodells

Während der geometrischen Verbesserung der Inkonsistenz im zweiten Beispiel (vgl. Abbildung 5) werden die inneren Objektgeometrien der beiden Gebäudemodelle gewahrt. Die Inkonsistenz der beiden Objekte zueinander wird ausschließlich durch die Bewegung der Gebäude im Bereich der äußeren Genauigkeiten der Ausgangsmodelle realisiert.

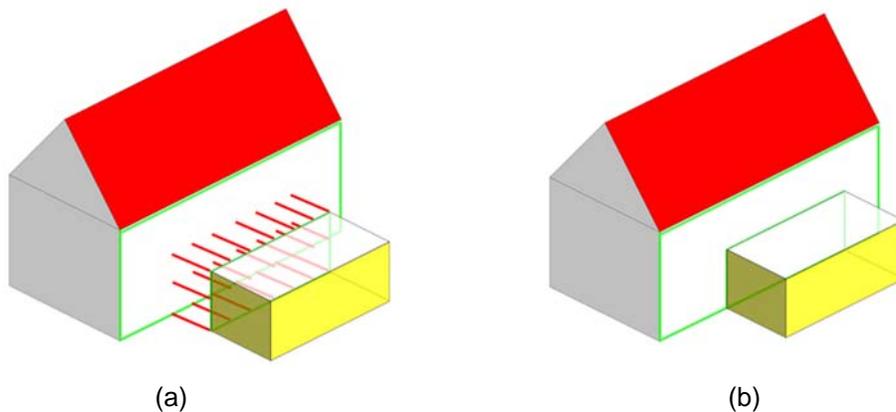


Abbildung 5: (a) Inkonsistenzvektoren vor der geometrischen Verbesserung (b) beseitigte Inkonsistenz durch Bewegung der Gebäudemodelle und unter Wahrung der inneren Geometrie der beiden Objekte

4.4 Qualitätsbetrachtung des Integrationsergebnisses

Auf der Grundlage des durchgeführten Harmonisierungsverfahrens und der darin enthaltenen funktionalen Algorithmen können Güterwerte und Genauigkeitsmaße abgeleitet werden. Es ist das Ziel, integrierte Modelle wie z.B. virtuelle 3D-Stadtmodelle bezüglich der Richtigkeit und somit ihrer Zuverlässigkeit vergleichbar zu machen, sowie Aussagen über die geometrische Genauigkeit treffen zu können.

Güterwerte der Integration sollen zum einen den Grad der wiederhergestellten geometrisch-topologischen Verbindungen zwischen den verknüpften Objekten der beiden Ausgangsmodelle

und zum anderen den Grad der bewahrten geometrisch-topologischen Beziehungen der Objekten innerhalb der Ausgangsmodelle angeben.

Zusätzlich sollen Genauigkeitsmaße für die Objekte des integrierten Modells ermittelt werden, welche in Form der Standardabweichung der Objekte angegeben werden. Diese lässt sich durch die Anwendung von Fehlerfortpflanzungsgesetzen und den Ausgleichungsergebnissen der Beobachtungen und Unbekannten ableiten.

Aussagen betreffend der Güte und Genauigkeit eines virtuellen Stadtmodells werden für viele Anwendungen, vor allem analytischer und simulierender Art, in Zukunft sehr hilfreich sein. Darüber hinaus stehen diese ermittelten Werte für eine mögliche weitere Integration zur Verfügung, wodurch eine unkontrollierte Fehlerfortpflanzung, wie sie bislang häufig auftritt, vermieden werden kann.

5 Modellierung der Geodatenschnittstelle in CityGML

Das Konzept der Geodatenschnittstelle wurde am Beispiel des standardisierten Datenmodells CityGML umgesetzt und zunächst als *Application Domain Extension* (ADE) modelliert. CityGML beinhaltet Klassen zur thematischen Einordnung von Objekten und legt deren geometrische Modellierung fest. CityGML bietet jedoch eine gewisse Flexibilität, sodass sich je nach Hersteller und in Abhängigkeit der geometrischen Datengrundlage, der semantischen Interpretation und des gewünschten Detailierungsgrades, eine Vielzahl von Möglichkeiten der semantischen und geometrischen Modellierung derselben Objekte in unterschiedlichen Modellen bietet. Die Beschreibung eines Anschlusses eines Objektes an ein Objekt eines anderen Modells wurde daher möglichst abstrakt formuliert, um zum einen für alle Klassen anwendbar zu sein und zum anderen der unterschiedlichen geometrischen und semantischen Modellierung gleicher Objektarten in unterschiedlichen Modellen Rechnung zu tragen.

Die Geodatenschnittstelle wird objektbezogen modelliert und beinhaltet eine Anzahl von Schnittstelleninformationen. Ein wesentlicher Bestandteil ist die Beschreibung des Teils eines Objektes, welches eine topologische oder geometrische Verbindung zu einem anderen Objekt beinhaltet. Diese Verbindungsstelle wird nachfolgend als „Konnektor“ bezeichnet. Konnektoren werden durch Punkte der bestehenden Objektgeometrien beschrieben und geben die Teilgeometrie des Objektes an, welche die Anschlussstelle beinhalten. Ein wesentlicher Vorteil besteht darin, dass keine zusätzlichen Geometrien erforderlich sind. Jedoch führt dieser Ansatz dazu, dass nicht immer die exakte Anschlusslinie oder -fläche geometrisch beschreibbar ist. Das Beispiel in Abbildung 6 zeigt, dass dieselbe Anschlussstelle zwischen einem Gebäude und einem Gehweg durch Konnektoren unterschiedlicher Dimensionen beschrieben werden kann. Repräsentiert die Unterkante der Wandfläche auch die Schnittlinie mit dem Gelände und somit auch mit dem Gehweg, kann diese als Linien-Konnektor die Anschlussstelle zum Gehweg geometrisch beschreiben. Wurde das Gebäude in den Untergrund verlängert modelliert, wird die Linie, an die der Gehweg anschließt, durch die Objektgeometrie nicht repräsentiert. In diesem Fall befindet sich die Anschlussstelle in der Wandfläche, sodass sich ein Flächen-Konnektor ergibt, welcher durch die Geometrie der Wandfläche beschrieben wird.

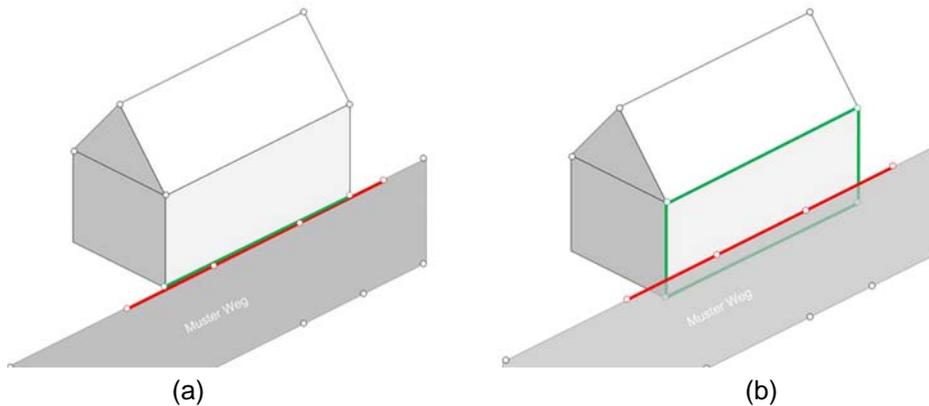


Abbildung 6: Anschlussstelle zwischen Gebäude und Weg wird durch Linien-Konnektor des Weges (rot) und (a) durch Linien-Konnektor des Gebäudes (grün) oder (b) durch Flächen-Konnektor des Gebäudes (grün) beschrieben

Abbildung 7 zeigt das UML-Diagramm der Geodatenchnittstelle. Die Basisklasse für die *Top Level*-Klasse *Interface* ist wie bei allen thematischen Klassen in CityGML die abstrakte Klasse *_CityObject*. Die Klasse *Interface* aggregiert die fünf Komponentenklassen *_Connector*, *TopologicalGeometricalRelation*, *ConnectionObject*, *ObjectAccuracy* und *_ObjectIntegrationBehavior*, welche die fünf Schnittstelleninformationen beinhalten.

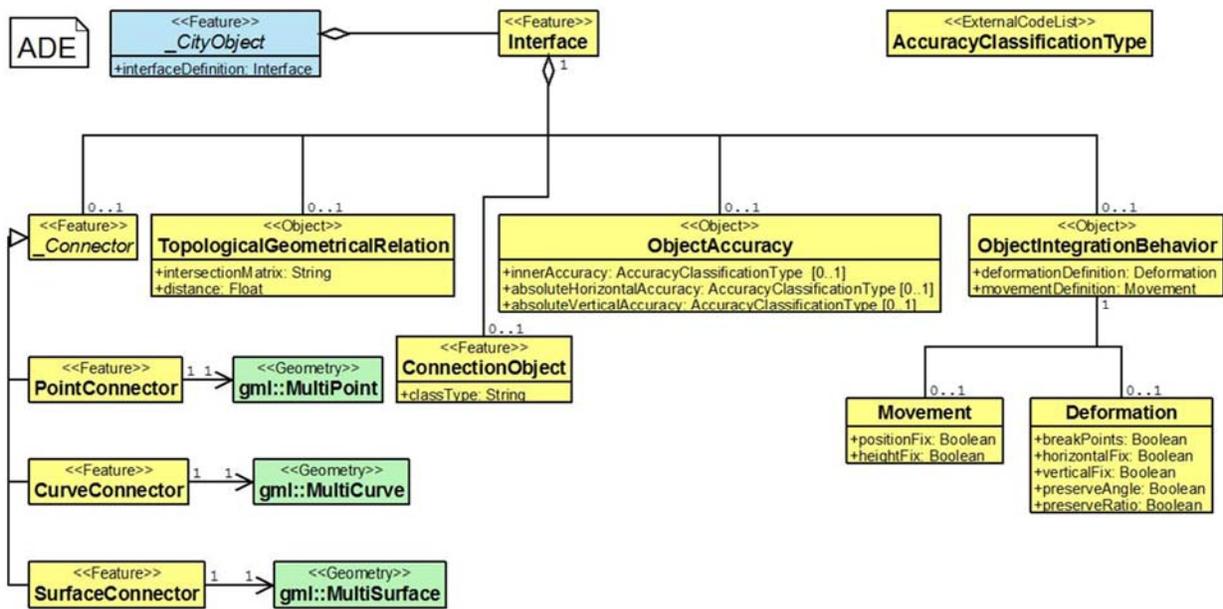


Abbildung 7: UML-Diagramm des konzeptuellen Schnittstellen-Objektes

Objektbezogene Geodatenchnittstellen können allen in CityGML enthaltenen Objektarten, wie Gebäude, Gewässer, Straßenobjekt, etc., mittels der Assoziation zur Klasse *Interface* zugewiesen werden. Die Geometrie des Konnektors wird durch Punkte der Objektgeometrie beschrieben,

welche unterhalb der abstrakten Konnektorklasse *_Connector* erneut gespeichert werden. Sie beinhaltet die Kind-Klassen *PointConnector*, *CurveConnector* und *SurfaceConnector*, welche wiederum durch GML3-Geometrien geometrisch repräsentiert werden. Die Komponentenkategorie *ConnectionObject* benennt die Anschlussobjektart in dem im Integrationsprozess partizipierenden Modell. Es wird die angenommene CityGML-Objektart durch das Attribut *classType* angegeben. Die Klasse *TopologicalGeometricalRelation* beinhaltet Attribute zur Beschreibung der räumlichen Beziehung der Konnektoren zueinander. Zum Speichern der topologischen Beziehungen zwischen zwei Konnektoren wird die Repräsentation der Dimensionsmatrix, analog zum *Simple-Feature-Modell*, genutzt. Die Klasse *ObjectAccuracy* beinhaltet drei Attribute zur Beschreibung der Genauigkeit des Objektes. Das Attribut *innerAccuracy* beschreibt die innere Genauigkeit der Objektgeometrie. Die absolute Genauigkeit der Koordinaten der Objekte wird unterteilt durch die Attribute *absoluteHorizontalAccuracy* und *absoluteVerticalAccuracy*. Für eine eindeutige Angabe der Genauigkeiten wird auf eine *ExternalCodeList* verwiesen. Die *AccuracyClassificationType*-Liste beinhaltet die Definition der Genauigkeitsstufen und der Namen, welche als Attributwerte der *ObjectAccuracy* möglich sind. Die Komponentenkategorie *ObjectIntegrationBehavior* beschreibt die Restriktionen zur Veränderung der Objektgeometrie während der geometrischen Homogenisierung. Sie besitzt zwei Attribute vom Typ *Deformation* und *Movement*. Der *Movement*-Typ beschränkt die Bewegung des gesamten Objektes durch das Festsetzen der Position und Höhe durch die Attribute *positionFix* und *heightFix*. Der *Deformation*-Typ beschränkt die Verformung der inneren Objektgeometrie durch das Festsetzen der horizontalen und vertikalen Verformung durch die Attribute *horizontal-Fix* und *verticalFix*. Ist eine Verformung erlaubt, können die Winkel und Streckenverhältnisse durch die Attribute *preserveAngle* und *preserveRatio* festgesetzt werden. Das Attribut *breakPoints* erlaubt zur Verformung des Objektes die Einführung neuer Stützpunkte in die Objektgeometrie. In der Masterarbeit des Erstautors wird das Konzept und das Modell der Geodatenschnittstelle ausführlich erklärt sowie weitere Beispiele gezeigt [Kaden, 2009].

6 Zusammenfassung und Ausblick

Basierend auf dem semantischen Modell von CityGML wurde ein Konzept vorgestellt mit dem Ziel, semantische 3D-Stadtmodelle verschiedener thematischer Inhalte und Herkünfte ad-hoc und automatisiert zu integrieren und dabei ein konsistentes Gesamtmodell zu erzeugen. In diesem Beitrag wurde das Problem der Integration komplexer 3D-Modelle gleicher Repräsentation (hier: CityGML) in Bezug auf Homogenisierung und geometrisch-topologisch konsistente Verknüpfung untersucht.

Kern des Konzepts ist die Schaffung einer neuartigen objektbezogenen Geodatenschnittstelle, welche attributiv die geometrischen und topologischen Zusammenhänge von Objekten unterschiedlicher Teilmodelle beschreibt, z.B. dass eine Gebäudeseite mit einem Gehweg verbunden ist. Diese Anschlussinformationen können während der Generierung eines Modells durch die Geodatenschnittstelle den betreffenden Objekten angefügt und für einen späteren Integrationsprozess vorgehalten werden. Die Geodatenschnittstelle beinhaltet neben den Anschlussinformationen auch Qualitätsmaße in Form der Genauigkeit der Ausgangsmodelle zur stochastischen Steuerung des anschließenden Homogenisierungsverfahrens. Zusätzliche objektbezogenen Steu-

erungsparameter in Form von geometrischen Bedingungen beschreiben die Bewegungs- und Verformungslimitation der Objekte während der Integration. Der Umfang der zusätzlich benötigten Informationen soll in einem Maße gering bleiben, dass eine automatisierte Annotation der Modelle unter vertretbarem Mehraufwand erfolgen kann. In weiterführenden Arbeiten sollen Testdatensätze erzeugt und mit der Geodatenchnittstelle versehen werden. Es wird ein Verknüpfungsalgorithmus implementiert, welcher auf dieser Datengrundlage Verbindungen zwischen den Objekten der unterschiedlichen Modelle herstellt. Die praktischen Untersuchungen sollen nützliche Erkenntnisse liefern, um Schnittstelleninformationen sowie die Modellierung der Schnittstelle zu optimieren.

Ein künftig noch im Detail zu entwickelnder Integrationsalgorithmus kann auf der Grundlage der Anschlussinformationen Verknüpfungen zwischen Objekten verschiedener Modelle herstellen und deren Inkonsistenzen bestimmen. Diese können im Anschluss statistisch analysiert und auf deren Grundlage geodätische Methoden zur geometrischen Verbesserung der Objekte gewählt werden, z.B. Transformation oder Ausgleichung. Durch die Berücksichtigung der in der Geodatenchnittstelle angegebenen Objektgenauigkeiten und der objektgeometrischen Bedingungen, werden die Verbesserungswerte für die Inkonsistenzen optimiert und ad-hoc ein bestmöglich homogenisiertes und geometrisch-topologisch konsistentes Gesamtmodell erzeugt. Es sollen optimale Qualitätsmaße abgeleitet werden, welche die Qualität des integrierten Modells repräsentieren. Eine Herausforderung ist es dabei, eine gemeinsame Bewertungsfunktion zu entwickeln, welche zum einen die möglichen geometrischen Residuale und zum anderen die wiederhergestellten und bewahrten topologischen Zusammenhänge beschreibt.

Zwar wird die Anwendung der Geodatenchnittstelle zur Anreicherung der Einzelmodelle, z.B. Gebäudemodelle, zunächst einmal einen gewissen Mehraufwand erfordern, jedoch werden sich die entstehenden Aufwendungen bei der Datenintegration stark reduzieren. Es soll gezeigt werden, dass durch eine geringe Anreicherung der Einzelmodelle mit Informationen, die Zeit für die Aufbereitung und Integration von Geodaten deutlich reduziert werden kann.

7 Literaturverzeichnis

- AG 3D-STADTMODELLE DES AK KOMMUNALES VERMESSUNGS- UND LIEGENSCHAFTSWESEN DES STÄDTETAGES NRW, 2004: 3D-Stadtmodelle – Eine Orientierungshilfe für die Städte in NRW, Städtetag Nordrhein-Westfalen
- CZERWINSKI, A., KOLBE, T. H., PLÜMER, L., STÖCKER-MEIER, E., 2006: Spatial data infrastructure techniques for flexible noise mapping strategies, Proceedings of the 20th International Conference on Informatics for Environmental Protection EnviroInfo, Graz, Austria
- DUCKHAM, M., WORBOYS, M. F., 2005: An algebraic approach to automated information fusion, International Journal of Geographical Information Science, v19 n5
- EMGARD, L., ZLATANOVA, S., 2007: Design of an integrated 3D information model, 26th Urban Data Management Symposium, October 10 - 12
- EMGARD, L., ZLATANOVA, S., 2007: Implementation alternatives for an integrated 3D information model, 2nd International Workshop on 3D Geo-Information, December 12 - 14
- KADEN, R., 2009: Entwicklung einer Geodatenchnittstelle zur semantisch basierten Integration von CityGML-Modellen, Masterarbeit, Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik,

- Technische Universität Berlin,
http://www.gis.tu-berlin.de/menue/mitarbeiter/robert_kaden/publikationen/
- KAMPSHOFF, S., 2005a: Mathematical Models for Geometrical Integration. Gröger, G., Kolbe, T. H. (Hrsg.), 1st International ISPRS/EuroSDR/DGPF-Workshop on Next Generation 3D City Models, Bonn, Deutschland, EuroSDR Publikation Nr. 49
- KAMPSHOFF, S., 2005b: Integration heterogener raumbezogener Objekte aus fragmentierten Geodatenbeständen, Dissertationsschrift, Fakultät für Bauingenieurwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
- KAMPSHOFF, S., BENNING, W., 2005: Homogenisierung von Massendaten im Kontext von Geodaten-Infrastrukturen, zfv - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, 130(3)
- KOCH, A., 2006: Semantische Integration von zweidimensionalen GIS-Daten und Digitalen Geländemodellen, Dissertationsschrift, Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie, Universität Hannover
- KOLBE, T. H., 2008: Representing and Exchanging 3D City Models with CityGML, Lecture Notes in Geoinformation & Cartography, Lee, J., Zlatanova, S. (Hrsg.), 20
- KOLBE, T. H., BACHARACH, S., 2006: CityGML: An Open Standard for 3D City Models, Directions Magazine, July 03
- OPEN GEOSPATIAL CONSORTIUM INC., 2008: OpenGIS City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard
- MICUS MANAGEMENT CONSULTING GMBH, 2001: Aktivierung des Geodatenmarktes in Nordrhein-Westfalen - Studie zum Wachstumspotenzial für Geoinformationen am Beispiel Nordrhein-Westfalens, Staatskanzlei des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf
- MICUS MANAGEMENT CONSULTING GMBH, 2003: Der Markt für Geoinformation: Potentiale für Beschäftigung, Innovation und Wertschöpfung, Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Düsseldorf
- PLÜMER, L., CZERWINSKI, A., KOLBE, T. H., 2006: Machbarkeitsstudie zur Umsetzung der EU-Umgebungslärmrichtlinie in NRW, Bonn
- SARJAKOSKI, T., SARJAKOSKI, L. T., 2005: The GiMoDig public final report. GiMo-Dig-project, Internal EC report
- SESTER, M., KIELER, B., VON GÖSSELN, G., 2007: Semantische und Geometrische Integration von Geodaten, Kartographie als Baustein moderner Kommunikation, Symposium 2007 in Königslutter am Elm, Kartographische Schriften, Band 14, Kirschbaum Verlag Bonn
- STADLER, A., KOLBE, T. H., 2007: Spatio-semantic Coherence in the Integration of 3D City Models, Proceedings of the 5th International Symposium on Spatial Data Quality, June 13-15, Enschede
- VOLZ, S., 2005: Data-Driven Matching of Geospatial Schemas, in Cohn, A.G., Mark, D.M. (eds.): Spatial Information Theory, Proceedings of the International Conference on Spatial Information Theory (COSIT '05), Ellicottville, NY, Lecture Notes in Computer Science 3693, Springer