

# VALIDIERUNG VON CITYGML-DATEN UND (SEMI-) AUTOMATISCHE FEHLERKORREKTUR

Frank Weichert, Daniel Bachmann, Ulrich Gruber, Sandra Schlüter, Christian Wessel, Thorsten Humberg

**Zusammenfassung:** Die dreidimensionale Darstellung detaillierter Stadtmodelle oder auch ganzer Regionen steht zunehmend im Fokus aktueller Entwicklungen. Mithilfe der Beschreibungssprache CityGML ist eine Erweiterung zweidimensionaler Karten auf detaillierte dreidimensionale Objekte möglich. Die dritte Dimension, um welche die vorhandenen 2D-Geodaten hierbei erweitert werden, bietet vielfältige Nutzungsmöglichkeiten für z. T. anspruchsvolle analytische Aufgaben und thematische Abfragen beispielsweise in der Stadtplanung, im Katastrophenmanagement, in der Wirtschaftsförderung oder im Tourismus. Verbunden mit diesem ubiquitären Nutzen ist aber auch die Sicherstellung einer durchgreifenden Qualitätssicherung der CityGML-Daten. Im Mittelpunkt des vorliegenden Projekts stehen daher erste Möglichkeiten eines nachhaltigen Qualitätsmanagements der (bereits vorhandenen) Daten, verbunden mit einer automatischen Validierung und (semi-) automatischen Fehlerkorrektur. Bedingt durch die Mechanismen zur Generierung von CityGML und nachträglichen Erfassungen können in den Daten unterschiedliche Ausprägungen von Fehlern auftreten. Eingebettet sind die Module zum Qualitätsmanagement in ein Visualisierungssystem, welches das Potenzial aktueller Grafikkarten nutzt und damit auch die Visualisierung großer Datenmengen ermöglicht. Vorhandene CityGML-Modelle werden auf potenzielle Fehler untersucht, in der fotorealistischen Darstellung der 3D-Modelle markiert und nachfolgend (semi-) automatisch korrigiert. Unterschiedliche Fehlertypen können so separiert, klassifiziert und schematisiert werden. Abschließend können die Korrekturen mittels WFS-T auf die Primärdatenhaltung geschrieben werden.

**Schlüsselwörter:** 3D-Stadtmodelle, CityGML, Qualitätssicherung, Fehlerdetektion, Fehlerbehebung

## // VALIDATION OF 3D CITYGML MODELS AND SEMIAUTOMATIC DETECTION AND CORRECTION OF ERRORS

**// Abstract:** Different authorities and institutions are increasingly focusing on the consistent construction of three-dimensional city models or even of whole regions with a very high level of detail. With the increasing multifunctional usability for demanding analytic duties and thematic queries, for example, in city planning, environment (e.g. air pollution control and noise prevention, solar potential analysis) or disaster management there is a greater need not only for 3D city or project models but also for a assured database and the drastic sustainability of the data stocks. In this study, we present a novel approach for detection, localization and identification of errors in virtual 3D city and landscape models – data sets are given in the CityGML-format (City Geography Markup Language format). The conceptual basis includes a quality management within the framework of well-chosen use cases and an interactive visualisation. The visualisation framework allows photorealistic visualisation of the 3D city models with an additional visualisation of errors, warnings or notices, found by above mentioned quality management.

**Keywords:** 3D City Models, CityGML, Quality Management, Error Detection, Error Correction

### Anschrift der Autoren

Dr. Frank Weichert  
Lehrstuhl Informatik VII  
Technische Universität Dortmund  
Otto-Hahn-Str. 16  
D-44221 Dortmund  
T: +49 (231) 755 6122  
E: frank.weichert@tu-dortmund.de

Daniel Bachmann  
Thorsten Humberg  
Christian Wessel  
Lehrstuhl Informatik VII  
Technische Universität Dortmund  
D-44221 Dortmund

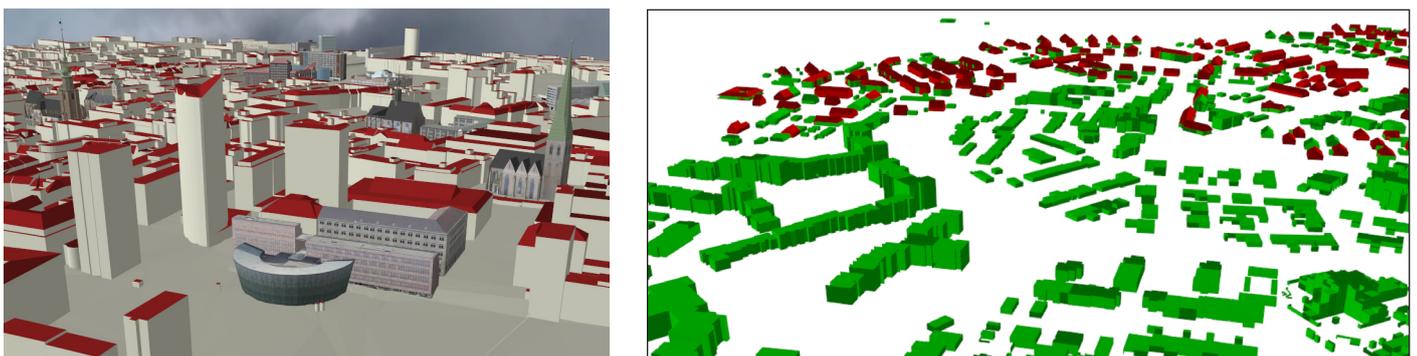
Ulrich Gruber  
Sandra Schlüter  
Kreis Recklinghausen  
Fachdienst 62 – Kataster und Geoinformation  
Kurt-Schumacher-Allee 1  
D-45657 Recklinghausen  
T: +49 (0)236 1/53-3041

## 1. EINLEITUNG

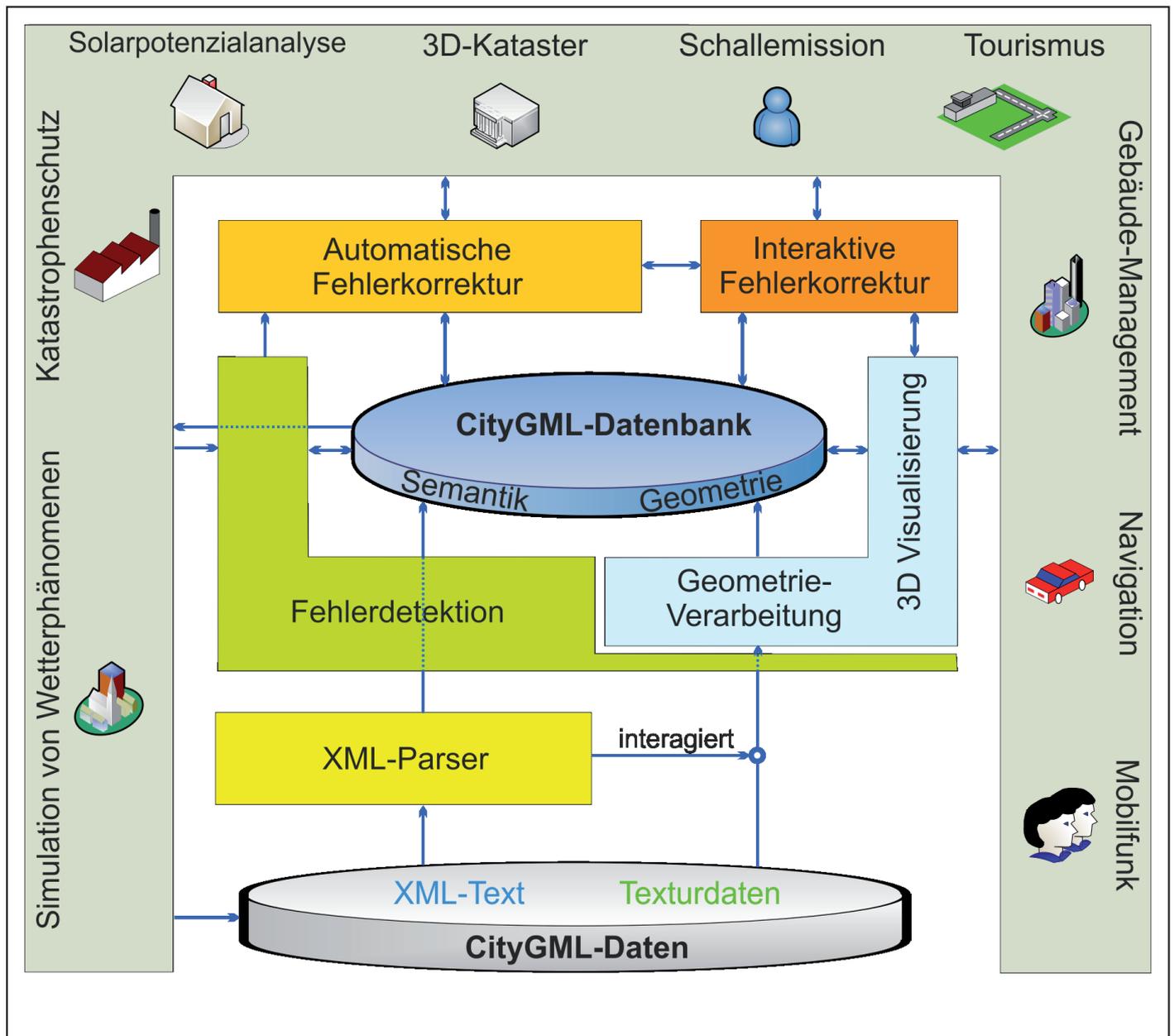
Die geotopologisch konsistente dreidimensionale Rekonstruktion von Stadtmodellen oder auch ganzen Regionen mit einem möglichst hohen Detailgrad steht zunehmend im Fokus aktueller Entwicklungen. Beispielsweise wurden in der Ruhrgebiets-Region in Zusammenarbeit mit der Kooperation „ruhr3.de“ ([www.ruhr3.de](http://www.ruhr3.de)) die vorhandenen Strukturen, Daten und Potentiale gebündelt und in einer digitalen Geodatenbasis mithilfe der Beschreibungssprache *City Geography Markup Language* (CityGML) bereitgestellt. Initiale Anwendungen beschränkten sich zunächst auf die Visualisierung von CityGML-Daten. Kommerzielle Viewer sind u. a. der *LandXplorer*® (Autodesk, Inc.) und das *BS Contact GEO*® (Bitmanagement Software), frei verfügbar ist *Aristoteles* (Instituts für Geodäsie und Geoinformation der Universität Bonn). Mit der zunehmenden multifunktionalen Nutzbarkeit für anspruchsvolle analytische Aufgaben und thematische Abfragen, beispielsweise der

- ▶ Stadtplanung
- ▶ Katastrophenmanagement
- ▶ Umwelt (z. B. Immissions- und Lärmschutz, Solarpotenzialanalyse)
- ▶ Wirtschaftsförderung
- ▶ Tourismus

steigt aber nicht nur der Bedarf an 3D-Stadt- bzw. Projektmodellen sondern auch an einer durchgreifenden Nachhaltigkeit der Datenbestände. Bisher wurden diese vielfach nur als rein graphische oder geometrische Modelle aufgebaut, semantische und topologische Aspekte aber meist vernachlässigt. Gerade die zunehmende Verwendung in verschiedenen Anwendungsszenarien bedarf aber einer gesicherten Datenbasis. Beispielsweise ist die korrekte Ausrichtung der Flächennormalen für die Solarpotenzialanalyse relevant oder die „Wasserdichtigkeit“ von Gebäuden zur Simulation von Evakuierungsszenarien. Die grundsätzliche Notwendigkeit einer entsprechenden Qualitätssicherung für geographische Datenbanken wurde in verschiedenen Arbeiten bereits angesprochen (Pantazis, 1997), (Geiger, 2004), sowohl bezogen auf CityGML-Daten (Benner et. al, 2004) aber auch zur Korrektur der Gebäudegeometrie mittels einer Oracle Datenbank (Kazar et. al, 2008). Auf den exemplarischen Anwendungsfall der Schallausbreitung wird in (Czerwinski et. al, 2006) eingegangen. Die zugrundeliegenden theoretischen Grundlagen für Konsistenztests im Kontext dreidimensionaler Stadtmodelle wurden von Gröger et al. erarbeitet (Gröger, Plümer, 2005), (Gröger, Plümer, 2009), (Gröger, Coors, 2010). Eine etablierte und allgemein verfügbare Qualitätssicherung für CityGML-Daten liegt trotzdem bis heute nicht vor. In diesem Beitrag geht es daher um die Notwendigkeit und erste Möglichkeiten eines durchgreifenden Qualitätsmanagements für kommunale und (über) regionale 3D-Modelle. In fachlicher Zusammenarbeit mit Vertretern von Kommunen im Ruhrgebiet wurde ein Konzept zur Qualitätssicherung erarbeitet und prototypisch in ein interaktives dreidimensionales Visualisierungssystem zur Fehlererkennung, Fehlerkorrektur und anwendungsbezogenen Darstellung integriert (s. Abbildung 1). Vorhandene CityGML-Modelle werden auf potenzielle Fehler untersucht, diese markiert und (semi-) automatisch korrigiert.



**Abbildung 1:** Dreidimensionale Visualisierung der Dortmunder Innenstadt in einer (a) Übersichtsdarstellung und (b) mit der Ausprägung fehlerhafter Gebäude (rot).



**Abbildung 2:** Schematische Darstellung zum Workflow der Analyse und Visualisierung von CityGML-Daten unter Beachtung unterschiedlicher Anwendungsszenarien.

Die konzeptionelle Basis der Umsetzung vermittelt die Abbildung 2. Dargestellt ist, ausgehend von den CityGML-Daten, die Einbettung des Systems zur Visualisierung und zum Qualitätsmanagement in den Rahmen ausgewählter Anwendungsszenarien. Der damit verbundene Daten- und Informationsfluss wird durch Pfeile repräsentiert. Auf die detaillierteren Aspekte des zugrundeliegenden Workflows wird in den nachfolgenden Abschnitten differenzierter eingegangen.

Ausgehend von dieser Sichtweise thematisiert der Abschnitt 2 zunächst die Grundlagen des CityGML-Standards und leitet zur Betrachtung des Qualitätsmanagements über (s. Abschnitt 3). Inhärente Teilaspekte sind Ursachen von Fehlern (s. Abschnitt 3.1) und deren Typisierung (s. Abschnitt 3.2), respektive Möglichkeiten zur Detektion und Korrektur (s. Abschnitt 3.3). Eine erste Evaluierung unter Berücksichtigung der Anforderungen des Qualitätsmanagements erfolgt im Abschnitt 4. Schließlich fasst der Abschnitt 5 noch einmal die wesentlichen Aussagen zusammen und gibt einen Ausblick auf zukünftige Entwicklungen.

## 2. CITYGML-STANDARD

Der CityGML-Standard beschreibt ein auf dem XML-Standard (Extensible Markup Language) basierendes Konzept zur Modellierung und Verteilung von dreidimensionalen virtuellen (Stadt-) Modellen. Im Gegensatz zu bekannten Vektor-basierten Formaten wie z. B. dem DXF-Format (AutoCad Drawing Exchange Format), sind neben den reinen Geometrie-Angaben auch topologische und semantische Informationen respektive Informationen über die äußere Erscheinung des jeweiligen Modells abgelegt. Entwickelt wurde der Standard ursprünglich von der SIG 3D (Special Interest Group 3D) der GDI NRW (Geodata Infrastructure North-Rhine Westphalia) (Gröger et. al, 2008). Seit August 2008 ist die Version 1.0.0 des CityGML-Standards als offizieller OGC®-Standard (Open Geospatial Consortium) anerkannt und somit ein erweiterbarer internationaler Standard zum Austausch von Geodaten. Das CityGML-Schema ist ein modularisiertes GML-Anwendungsschema, welches eine Aufteilung in einzelne thematische Module vornimmt (Modularisierung) und die Möglichkeit zur Erweiterung des Schemas um weitere Fachschalen (Application Domain Extensions (ADE)) bietet. Dabei können in CityGML-Datensätzen mehrere Fachschalen gleichzeitig verwendet werden – für CityGML besteht u. a. bereits eine Noise-ADE. Für eine ausführliche und vollständige Beschreibung des CityGML-Standards sei u.a. auf die Spezifikation verwiesen (Gröger et. al, 2008).

### 2.1 ANFORDERUNGEN ZUR KONFORMITÄT

Neben dem Konzept der Modularisierung werden über die ISO-Norm 19105 (ISO/TC 211, 19105 [2000]) auch Anforderungen zur Konformität (Conformance Requirements) an CityGML-Instanzdokumente gestellt. Dies sind Begrenzungen oder Einschränkungen, zu welchen die ISO-Norm 19105 folgende drei vorzunehmenden Prüfungen vorschreibt:

- ▶ Ziel der Konformitätsprüfung
- ▶ Methode bzw. Grundlage der Konformitätsprüfung zu ausgewählten Abschnitten der CityGML-Spezifikation
- ▶ Bewertung des Ergebnisses

Die CityGML-Spezifikation beinhaltet neben umfangreichen Konformitätsanforderungen, welche neben dem Schema weitere Vorgaben für die Instantiierung beinhalten, auch zahlreiche Requirements. In der „Request for Comments-Phase“, im Standardisierungsprozess von CityGML durch die OGC®, wurden weitere Konformitätsanforderungen erfasst und durch die SIG 3D der GDI NRW eingereicht. Diese sind nicht in den XML-Schemadateien enthalten und deren Einhaltung kann nicht durch Schema-Validierung überprüft werden. Bei der OGC® liegen Überlegungen vor, Prüfscenarien zu entwickeln, welche Konformitätsüberprüfungen von CityGML-Instanzdaten ermöglichen – eine Realisierung hat zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht begonnen.

### 2.2 CITYGML-SCHEMA UND -PARSER

Ein prinzipielles Problem beim Parsen von CityGML-Daten liegt in der Tatsache begründet, dass diese in verschiedenen Ausprägungen vorliegen, beispielsweise die explizite CityGML-Version und der Detailgrad, und dies u.a. bei der inkrementellen Validierung von XML beachtet werden muss (Balmin et. al, 2004). Innerhalb von CityGML wird zwischen verschiedenen Detailstufen, den sogenannten Level of Detail (LoD), unterschieden. Die Detailstufen sind für unterschiedliche Anwendungszwecke konzipiert worden und unterteilen sich in aufsteigender Detailstufe (Gröger et. al, 2008). Allgemein transformiert ein Parser eine textuelle Eingabe (in Form einer Zeichenkette) in eine divergente Darstellungsform, die zur weiteren Verarbeitung geeignet ist (vgl. auch Abbildung 2). Aus diesem Grund sollte ein CityGML-Parser zum einen gegen das CityGML-Schema validieren können, möglichst mit einem generischen Ansatz, um auf eventuelle Versionswechsel im Schema flexibel reagieren zu können. Zum anderen sollte ein CityGML-Parser die XML-Instanzdokumente auch hinsichtlich der Einhaltung der in der Spezifikation verpflichtend vorgegebenen Konformitätsanforderungen überprüfen. Mit *XML-Spy* [Altova GmbH] und *Oxygen* [SyncRO Soft Ltd.] stehen

prinzipiell kommerzielle Programme zur Überprüfung der Validität bereit. In ersten Tests zeigte sich aufgrund der DOM-basierten Importroutine aber eine eingeschränkte Nutzbarkeit im Hinblick auf den Speicherverbrauch für umfangreichere Datensätze. Ein SAX-basierter Parser, beispielsweise Xerces [Apache Software Foundation], wird daher bevorzugt.

### 3 QUALITÄTSMANAGEMENT

In Anbetracht der zunehmenden Durchdringung komplexer Stadtmodelle auf Basis von CityGML-Daten in weitreichenden Anwendungsbereichen ist ein nachhaltiges Qualitätsmanagement notwendig. Ausgehend von dieser Anforderung zeigen die nachfolgenden Abschnitte Ursachen von Fehlern auf, differenzieren diese und diskutieren Möglichkeiten zur Detektion.

#### 3.1 URSACHEN VON FEHLERN

Allgemein kann davon ausgegangen werden, dass es für das Auftreten von Fehlern unerheblich ist, ob eine ausschließliche 3D-Erfassung (z.B. Google SketchUp, Autodesk 3ds Max) vorliegt oder eine Extrusion auf Basis von modifizierten 2D-Geometrien (SupportGIS-3D). Beide Mechanismen unterbinden beispielsweise nicht, dass innenliegende Geometrien nicht gelöscht werden, nicht geschlossene Körper resultieren oder bei benachbarten Geometrien die Punkte nicht korrekt erfasst werden, sodass sich Löcher in den Körpern ergeben. Auch die Erzeugung von 3D-Geometrien aus modifizierten ALK/ALKIS®-Grundrissen kann insbesondere bei benachbarten Gebäuden zu Problemen führen, da bei diesen nicht in jedem Fall von Fehlerfreiheit ausgegangen werden kann. Zur Konvertierung nach CityGML werden vorhandene Export-Schnittstellenformate wie VRML (Virtual Reality Modeling Language) oder KML (Keyhole Markup Language) als Zwischenformate genutzt. Diese bilden jedoch insbesondere die Semantik von CityGML nicht oder nur unzureichend ab. Ein Beispiel für eine funktionierende Übertragung nach CityGML stellen Daten dar, die im internationalen Standard Industry Foundation Classes (kurz IFC) modelliert sind. Es ist möglich, diese einschließlich ihrer semantischen Eigenschaften wie Klassifizierungen und Attributierungen in beliebigen Detailstufen nach CityGML zu portieren (Kolbe, 2008), (Benner et. al, 2004). Im Bereich der verfügbaren Digitalen (Raster-) Geländemodellen (kurz DGM) bestehen häufig Probleme insbesondere an den Kachelrändern. Hier sind Höhendifferenzen von über 10 m bei identischen Punkten in benachbarten Kacheln vorhanden. Daraus ergeben sich insbesondere Probleme bei der erforderlichen Dreiecksvernetzung zur Visualisierung. Die zuvor genannten Ursachen von Fehlern sind nur als Beispiele zur Verdeutlichung der Entstehung von Fehlern zu verstehen und erheben daher auch keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Aus den Ausführungen sollte aber die Komplexität der Sachlage deutlich werden, die sich auch in der im nachfolgenden Abschnitt thematisierten Klassifizierung und Beschreibung von Fehlern widerspiegelt.

#### 3.2 DIFFERENZIERUNG VON FEHLERTYPEN

Bedingt durch die im vorhergehenden Abschnitt 3.1 aufgezeigten Mechanismen zur Generierung von CityGML können sich unterschiedliche Ausprägungen von Fehlern manifestieren. Derartige Retardierungen sind im Hinblick auf eine sachgerechte Verwendung in darauf aufbauende Anwendungsszenarien problematisch. Fehlerbewertungen folgen vielfach dem Vorbild genetischer Defekte in der Natur und werden dementsprechend in phänotypisch stumme und ausprägende Typen unterschieden. Dieses bedeutet, dass das Vorhandensein eines Fehlers nicht unabdingbar mit einer direkten visuell erkennbaren Ausprägung einhergeht, eine Manifestierung aber im Laufe von Ver- und Überarbeitungsvorgängen auftreten kann. Zudem ist zu differenzieren, ob Fehler dem Ausgangsdatenbestand entstammen, im Workflow der Übertragung oder in der konzeptionellen Basis von CityGML liegen. Aggregierend ergibt sich eine Unterscheidung in

- ▶ syntaktische,
- ▶ lexikographische und
- ▶ geometrische Fehler,

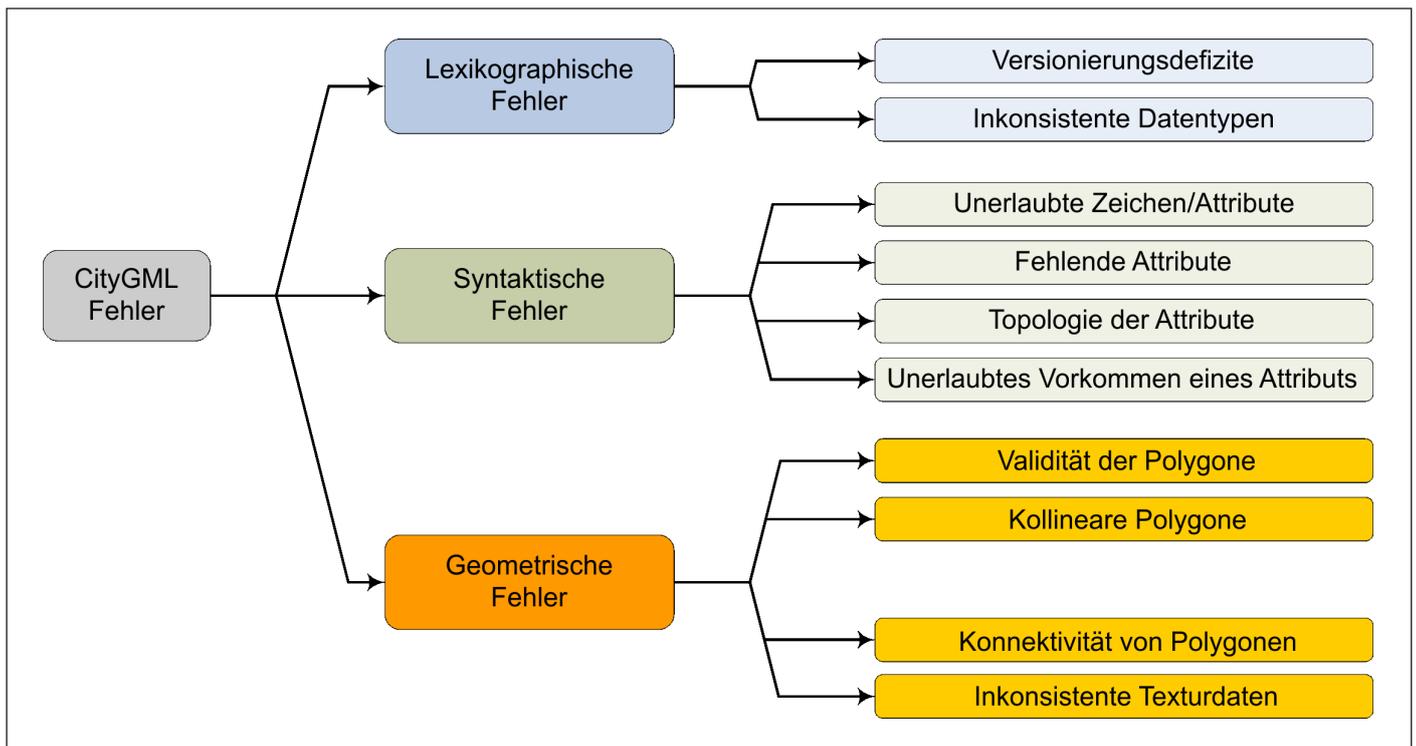


Abbildung 3: Schematische Darstellung zur Strukturierung der Fehlertypen.

welche auch in der Abbildung 3 in einer hierarchischen Anordnung vermittelt werden. Im Folgenden wird thematisiert, welche konkreten Fehlerausprägungen sich hinter diesen Begriffshülsen verbergen, worin ihre Ursachen zu sehen sind und wie sich jeweils die speziellen Fehler vermeiden lassen oder, in Prädiktion auf den Abschnitt 3.3, welche Mechanismen im Hinblick auf eine (semi-) automatische Korrektur zur Verfügung stehen. Für den Typus der lexikographischen Fehler liegt zudem eine Unterscheidung in Versionierungsdefizite und inkonsistente Datentypen nahe. Versionierungsdefizite sind primär bedingt durch Schemaaktualisierungen im Prozess des fortentwickelten CityGML-Datenmodells. In Abhängigkeit der Portierung aus den Basisdaten können identische Punktmengen unterschiedliche (informationstechnische) inkonsistente Datentypen (z. B. `double` und `int`) aufweisen, welche in der nachgeschalteten Visualisierung zu Darstellungsfehlern führen können.

Vergleichbar zu den lexikographischen Fehlern kann auch ausgehend von den Vorbemerkungen eine Ausprägung der syntaktischen Fehler in die Differenzialfehler

- ▶ unerlaubte Zeichen/Attribute
- ▶ fehlende Attribute
- ▶ unerlaubtes Vorkommen eines Attributs
- ▶ Topologie der Attribute

vorgenommen werden. Hierbei vermitteln die ersten drei Fehlertypen eine intuitive Vorstellung von deren Instanziierung und Detektion — diese kann über eine logische Evaluierung, als inhärenter Teilschritt des City GML-Parsers, erfolgen (Validierung). Sowohl lexikographische als auch syntaktische Fehler können neben semantischen Defiziten, Auswirkungen auf die Visualisierung hervorrufen, da Fehler in der Geometrie vielfach Reflexionen unplausibler Zustände von attributierten georeferenzierten Daten sind. Vergleichbar zu den vorgenannten Fehlerklassen kann auch für geometrische Fehler eine Differenzierung in explizite Typen erfolgen:

- ▶ nicht-valide Polygone
- ▶ kollineare Polygone
- ▶ fehlerhafte Konnektivität von Polygonen
- ▶ inkonsistente Polygonorientierung

Im Vorfeld einer weitergehenden Diskussion wird der Begriff des Polygons eingehend betrachtet. Ein Polygon ist eine planare geometrische Figur, die durch ihre Eckpunkte  $\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_n \in \mathbb{R}^3$  eindeutig definiert ist. Die Segmente  $\mathbf{p}_i \mathbf{p}_{i+1}, 1 \leq i < n$  und  $\mathbf{p}_n \mathbf{p}_1$  werden Kanten des Polygons genannt. Als valide wird ein Polygon bezeichnet, wenn es sich wie folgt charakterisieren lässt: Sei  $S_d$  ein  $d$ -dimensionaler Simplex, d. h. eine Punktmenge, die zu  $S_d = \{ \mathbf{p} \mid \mathbf{p} = (p_1, \dots, p_d), 0 \leq p_1 \leq \dots \leq p_d \leq 1, p_1 + \dots + p_d \leq 1 \}$  topologisch äquivalent ist. Zweidimensionale Simplexe werden auch als Dreiecke bezeichnet. Diese setzen sich aus eindimensionalen Simplexen (Kanten) und nulldimensionalen Simplexen (Knoten) zusammen. Simplexe der Dimension  $d-1$  werden auch Seitensimplexe von  $S_d$  genannt. Sei des Weiteren ein Simplizialer Komplex  $K_d$  eine endliche Menge von  $d$ -Simplexen für die gilt, dass

- ▶ der Durchschnitt von je zwei Simplexen entweder leer oder ein Seitensimplex ist und
- ▶ mit jedem Simplex auch alle seine Seitensimplexe zur Menge gehören.

Ein simplizialer Komplex sei genau dann homogen, wenn jeder Simplex der Dimension kleiner  $d$  ein Seitensimplex eines Simplexes der Dimension genau  $d$  ist. Für weitere Details sei auf (Abramowski, Müller, 1991) verwiesen. Somit ist ein Polygon genau dann valide, wenn es sich durch einen planaren homogenen 2-Komplex beschreiben lässt. Aufgrund von Rechenungenauigkeiten wird dieser Begriff in der Hinsicht erweitert, dass ein Polygon zusätzlich einen Flächeninhalt aufweisen muss, der einen Grenzwert  $\varepsilon$  nicht unterschreitet. Analog gilt dies für mögliche Abweichungen bzgl. der Planaritätsforderung. CityGML-Gebäude können dabei durch ein sogenanntes `solid` oder ein `multisurface` beschrieben werden. Ein `solid`  $C = \{P_1, \dots, P_n\}$ , im Folgenden Festkörper genannt, ist dabei genau dann gültig, wenn

- ▶  $P_1, \dots, P_n$  valide Polygone,
- ▶ der Durchschnitt zweier Polygone entweder leer oder Knoten bzw. Kante beider Polygone,
- ▶ jede Kante eines Polygons  $P_i$  auch Kante genau eines weiteren Polygons  $P_j$ ,
- ▶ die Flächennormalen nicht ins Innere des Festkörpers zeigen,
- ▶  $P_1, \dots, P_n$  zusammenhängend und
- ▶ für jeden Knoten  $\mathbf{p}_j$  die Polygone  $P_i$ , die  $\mathbf{p}_j$  enthalten, zusammenhängend

sind. Vergleichbar wird ein `multisurface`  $M = \{P_1, \dots, P_n\}$  durch eine Menge valider Polygone ohne weitere Eigenschaften beschrieben. Diese Darstellungsform wird daher auch als „Polygon-Suppe“ bezeichnet. Für eine detailliertere Darstellung sei auf (Gröger, Coors 2010) verwiesen. Eine fehlerhafte Konnektivität von einzelnen Polygonen zu einem CityGML-Gebäude liegt genau dann vor, wenn die beschriebene Geometrie die Anforderungen an ein `solid` nicht erfüllt. Liegt ein `multisurface` vor, kann ein solcher Test der Konnektivität der Polygone nur aus anwendungsbezogener Sicht sinnvoll sein, da hier vom Standard keine Einschränkungen bzgl. der Topologie vorgegeben werden.

Bezogen auf die Visualisierung erscheint eine Differenzierung in sichtbare und unsichtbare Fehler ein weitergangbarer Ansatz. Visuell manifestierte Fehler beruhen vielfach auf inakkuraten Grenzen zwischen Polygonen (Borodin et. al 2002). Resultierend kommt es beispielsweise zu Überschneidungen (Overlaps) oder Lücken (Gaps), welche ihre Ursache in der Fusion zwischen unterschiedlichen Datenquellen oder Rechenungenauigkeiten haben können (Shewchuk 1998). Im Zusammenhang mit der Bewertung der Flächengröße sind auch kollabierte Polygone (Flächeninhalt gleich null) vergleichbar zu detektieren. Neben sichtbaren Fehlern sind auch

unsichtbare beispielsweise innenliegende Flächen zu beachten, da im Kontext moderner Informations- und Kommunikations-Technologien (IKT, z. B. PDA) auch der Speicherbedarf beachtet werden muss. Unsichtbare Fehler können ihren Ursprung in Digitalisierungsfehlern, Verschneidungen oder falschen Maßangaben haben und sich auch in doppelten Punkten/Kanten zeigen (vgl. Abschnitt 3.1). Zudem bilden sie eine Anbindung zu Fehlern auf Basis topologischer Relationen. Überlappende oder sich schneidende Strukturen sind einfache Ausprägungen, komplexer sind ineinander verschachtelter Strukturen (Matrjoschka-Prinzip) zu ermitteln, deren Validität sich vielfach nur aus dem Kontext ableiten lässt – mit Texturdaten gekoppelt, resultiert ein defizitärer Speicherverbrauch.

### 3.3 DETEKTION UND KORREKTUR VON FEHLERN

Ausgehend von den im vorhergehenden Abschnitt einleitend aufgezeigten Methoden zur Detektion von Fehlern, werden diese Techniken im Folgenden für geometrische Fehler (vgl. Abbildung 4) konkretisiert. Zum Kontext syntaktischer und lexikographischer Fehler sei auf den Stand der Technik in den Abschnitten 1 und 2 verwiesen.

#### 3.3.1 DETEKTION VON FEHLERN

Die Detektion nicht-valider Polygone wird durch die im Folgenden dargestellte Gruppe von Tests bereitgestellt:

- ▶ Geschlossenheit
- ▶ doppelte Punkte
- ▶ Flächeninhalt  $> \varepsilon$
- ▶ Selbstüberschneidungen
- ▶ Planarität.

Aus Effizienzgründen erfolgt der Test auf Selbstüberschneidungen über einen klassischen Sweepline-Algorithmus (Berg et. al, 2008). Das Planaritätskriterium ist genau dann erfüllt, wenn die Abstände der Punkte des betrachteten Polygons von der durch drei nicht kollineare Punkte desselben aufgespannten Ebene kleiner als ein vorgegebenes  $\hat{\varepsilon}$  sind. Hierbei sei betont, dass im Allgemeinen  $\varepsilon \neq \hat{\varepsilon}$  gewählt wird. Zur Betrachtung weiterer geometriebasierter Fehlertypen wird vorausgesetzt, dass alle Polygone des betrachteten Modells mittels eines geeigneten Triangulierungsverfahrens (Chew, 1989) in ein möglichst geschlossenes Dreiecksnetz überführt wurden. Dies ist für ein durch multisurfaces modelliertes Gebäude im Allgemeinen nicht möglich. Es hat sich jedoch gezeigt, dass aufgrund der Beschaffenheit vieler praktisch eingesetzter Exportroutinen auch Festkörper durch multisurfaces modelliert werden. So werden mithilfe dieses Vorverarbeitungsschrittes durch Aufbau einer Kohärenzrelation (vgl. Abschnitt 3.3 und (Borodin et. al, 2004)) solids aus den multisurfaces rekonstruiert und innenliegende Polygone und vorhandene Lücken (Gaps) identifiziert. Ledoux diskutiert ein Verfahren, welches unter Verwendung einer dreidimensionalen Constraint-Delaunay-Triangulierung die Validität eines solids prüft (Ledoux et. al, 2009). Ein Test auf kollineare Polygone wird durch die Triangulierung auf das äquivalente Problem bezüglich einzelner Dreiecke reduziert. Da kollineare Polygone insbesondere zwischen angrenzenden Gebäuden auftreten und daher das gesamte Modell betrachtet werden muss, werden beschleunigende Raumpartitionierungsverfahren (Berg et. al, 2008) angewendet. Ein fehlerhaft orientiertes Polygon kann durch einen einfachen Kantenvergleich detektiert werden. Jede gerichtete Kante kann bzgl. eines Gebäude-Modells nur genau einmal vorkommen. Anderenfalls muss eine fehlerhaft orientierte Fläche vorliegen (Veleva, Felkel, 2007). Zudem besteht ein Ansatz zur Vermeidung mehrfach verschachtelter Texturen über Culling-Techniken, dem Abschneiden nicht sichtbarer Regionen. Voraussetzung zur Nutzung entsprechender Algorithmen ist aber auch eine korrekte Orientierung und Planarität von Polygonen. Dieser Aspekt zeigt auch die Komplexität der Sachlage und motiviert einleitend, dass verschiedene Korrekturmechanismen genutzt werden sollten (s. nachfolgenden Abschnitt 3.3.2).

### 3.3.2 (SEMI-) AUTOMATISCHE KORREKTUR

Der im vorhergehenden Abschnitt erläuterten Fehlerdetektion sollte sich eine automatische Korrektur der Fehler anschließen. Dieses Vorgehen ist jedoch nicht in jedem Kontext adäquat, da die geotopologische und semantische Konformität des korrigierten Modells stets gewährleistet sein muss. Daher werden die Fehlertypen zunächst nach Korrekturverfahren erneut klassifiziert und darauf basierend ein Korrekturschema eingeführt. Es werden die folgenden Korrekturklassen unterschieden:

- ▶ semi-automatisch
- ▶ automatisch.

Hierbei wird die Korrektur als semi-automatisch bezeichnet, wenn sie durch Interaktion mit dem Nutzer erfolgt. Erfolgt diese autonom, so wird die Korrektur als voll-automatisch bezeichnet. Jeder Fehlertyp wird innerhalb des visualisierten Modells farblich hervorgehoben, sodass eine visuelle Klassifikation erfolgt.

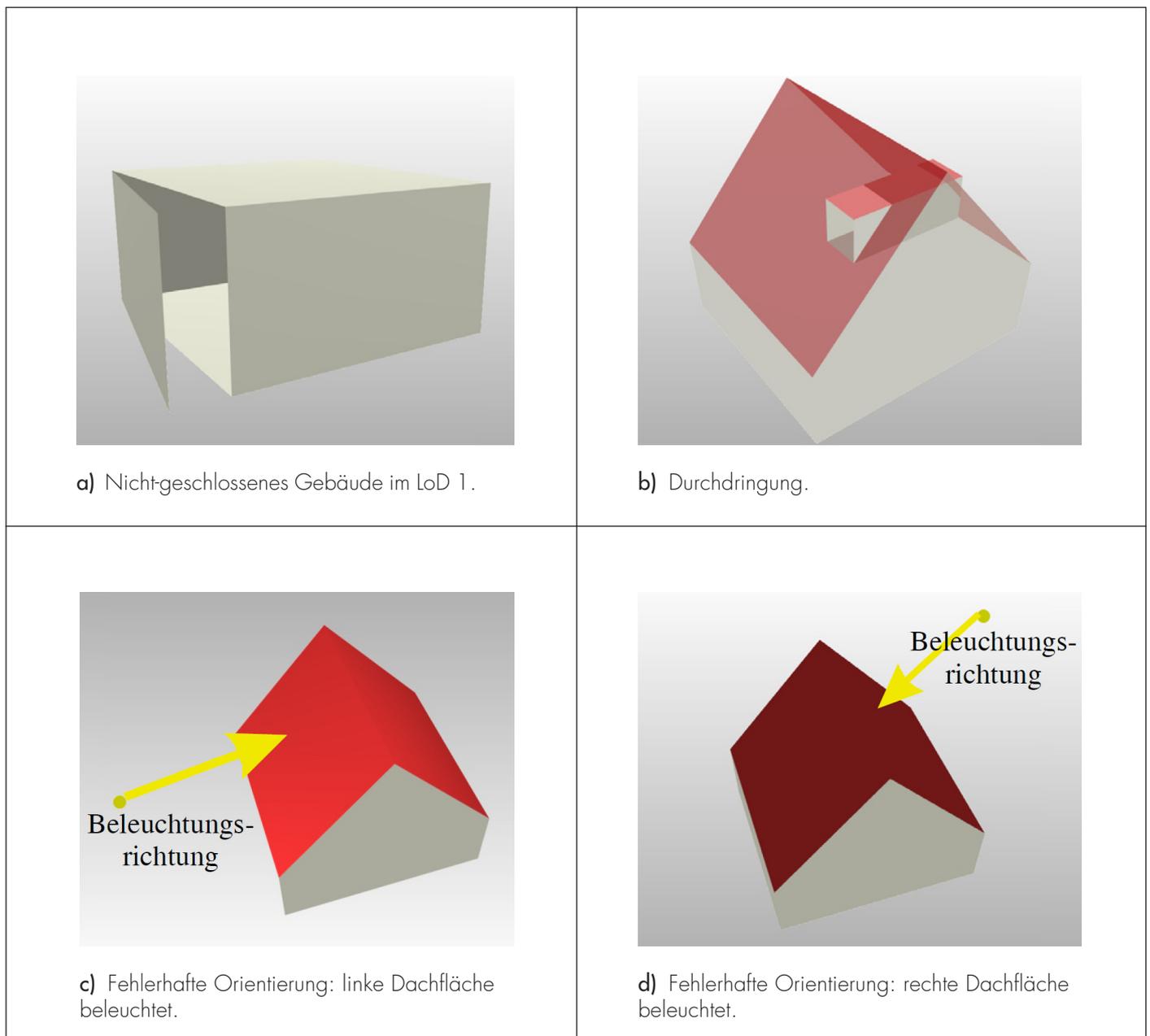
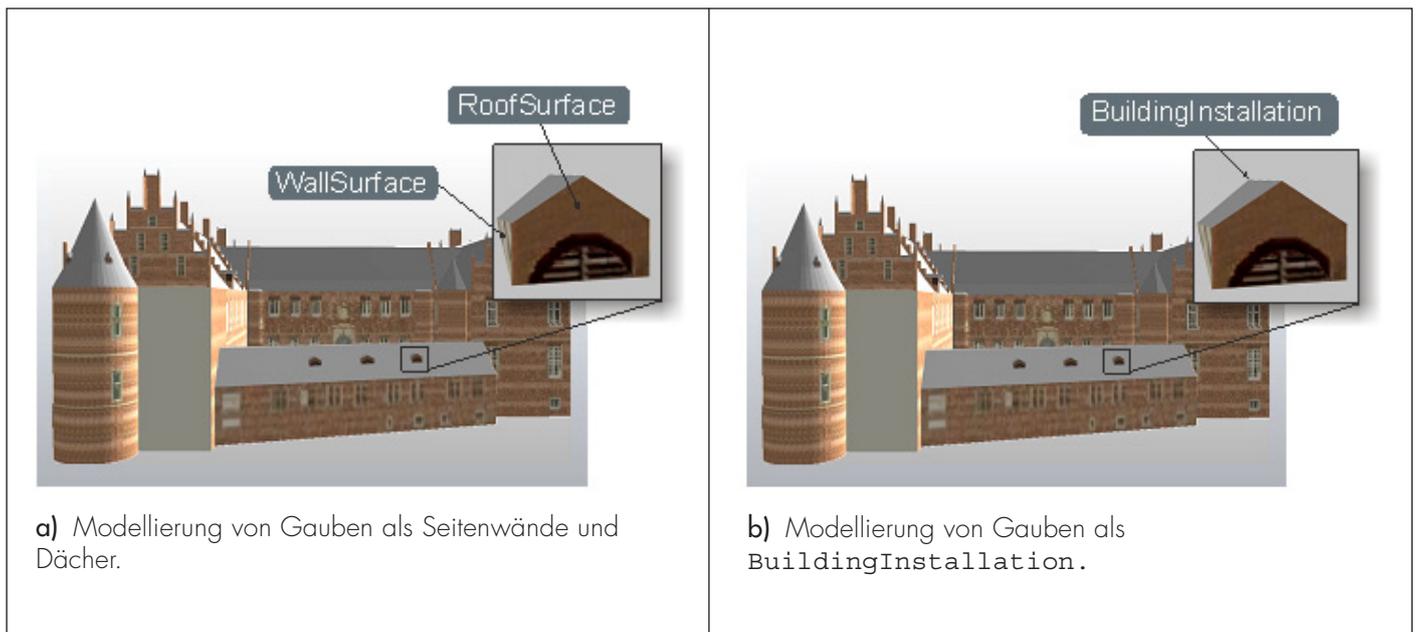


Abbildung 4: Exemplarische Darstellung geometrischer Fehlertypen.



**Abbildung 5:** Exemplarische Darstellung zur Modellierung einer Gaube, bei der die mögliche Fehlerausprägung durch Ungenauigkeiten in der Spezifikation nicht eindeutig zu deklarieren ist.

Geometrische Fehlertypen, welche die Topologie eines Modells nicht verändern, werden voll-automatisch korrigiert. Hierzu zählt z.B. das Entfernen doppelter (koplanarer/kollinearer) Strukturen innerhalb eines Gebäude-Modells. Durch Übernahme der Referenzen des zu entfernenden geometrisch identischen Objekts wird die semantische Konsistenz gesichert. Innenliegende Flächen können ersatzlos entfernt und die Planarität von Polygonen kann, soweit die Abweichung einen Toleranzwert nicht überschreitet, durch einfache Projektion in die betreffende Ebene realisiert werden.

Nach der Planarisierung muss ein erneuter Konnektivitätstest durchgeführt werden, um eine ungewünschte Änderung der Topologie zu verhindern. Ist eine eindeutige Entscheidung nicht möglich, wird durch Interaktion mit dem Benutzer die Korrektur angestoßen. Fehlerhaft orientierte Polygone können voll-automatisch korrigiert werden. Hierzu findet das Verfahren von Borodin (Borodin et. al, 2004) Anwendung, welches auf einer Eingabemenge aus unabhängigen Polygonen aufsetzt. So kann von Problemen bezüglich der Konnektivität von Polygonen abstrahiert werden. In einem ersten Schritt werden die einzelnen Polygone zu 2-mannigfaltigen Patches zusammengefasst. Diese werden konsistent orientiert. Um die Patches zu identifizieren, die ähnlich zu orientieren sind, wird in einem zweiten Schritt eine Kohärenzrelation zwischen den Rändern der Patches aufgebaut. Hierzu findet das bereits erwähnte Raumpartitionierungsverfahren erneute Anwendung (vgl. Abschnitt 3.3.1). Nachdem ein Maß für die mögliche Orientierung der Patches zueinander aufgebaut ist, muss ein Maß für die global korrekte Orientierung des Modells identifiziert werden. Hierzu wird mithilfe der GPU eine Sichtbarkeitsrelation erstellt und die Vorder- und Rückseiten der Patches durch eine eindeutige Einfärbung markiert. Entlang der Knoten einer triangulierten Oberfläche einer das Modell umgebenden Sphäre werden Sichtstrahlen aufgebaut, entlang derer das betrachtete Modell gerendert wird. Durch Auslesen des Framebuffers werden die Sichtbarkeiten bezüglich der einzelnen Patches akkumuliert. Eine Kombination dieser beiden Maße ermöglicht in einem finalen Schritt die Ableitung der korrekten Orientierung des Modells. Für Details des Verfahrens sei auf (Borodin et. al, 2004) verwiesen.

Alle die Konnektivität von Polygonen zu Festkörpern oder **multisurfaces** betreffenden Fehler müssen aufgrund inhärenter Ambiguitäten stets semi-automatisch korrigiert werden. Beispielsweise wurde innerhalb

der Abbildung 5(a) eine Dachgaube mit Seitenwänden und Dachflächen modelliert. Die Hauptdachfläche ist an dieser Stelle ausgespart. Abbildung 5(b) zeigt den semantisch identischen Fall, nur wurde in diesem Fall die Dachgaube als `BuildingInstallation` modelliert, wobei die Hauptdachfläche geschlossen ist. Beide Varianten lassen sich durch Instanzen des CityGML-Schemas abbilden und sind in mehreren Stadtmodellen enthalten. In vergleichbarer Ausprägung finden sich im Bereich der Modellierung von Geschossen, Bauteilen, Vordächern, usw. vergleichbare Beispiele.

### 3.4 ÜBERNAHME DER KORREKTURDATEN

Insbesondere die in den Abschnitten 3.3.1 und 3.3.2 beschriebenen automatisiert bzw. semi-automatisch erzeugten Korrekturen müssen auf eine Datenhaltung geschrieben werden, um die nachhaltige Verbesserung des Gesamtdatenbestandes zu erreichen. Eine standardisierte Lösung für Web-basierte lesende bzw. schreibende Zugriffe auf Datenbanken ist der `Web Feature Service (WFS)` der `OGC`<sup>®</sup>. Sofern die Datenhaltungssoftware diesen Dienst unterstützt, können Korrekturdatensätze, die von der Prüfsoftware erstellt wurden, mithilfe von Transaktionsoperatoren (engl. `transaction operations`) wirtschaftlich die Fortführung der Datenhaltung durchführen. Hierbei ist auf Versionskonflikte, Referenzen bzw. die Erhaltung der Konsistenz aller Objekte in der Datenhaltung zu achten. Um diese Anforderungen bereits bei der Erzeugung der Korrektursätze berücksichtigen zu können, müssen vollständige Datenauszüge verarbeitet werden.

## 4. EVALUIERUNG

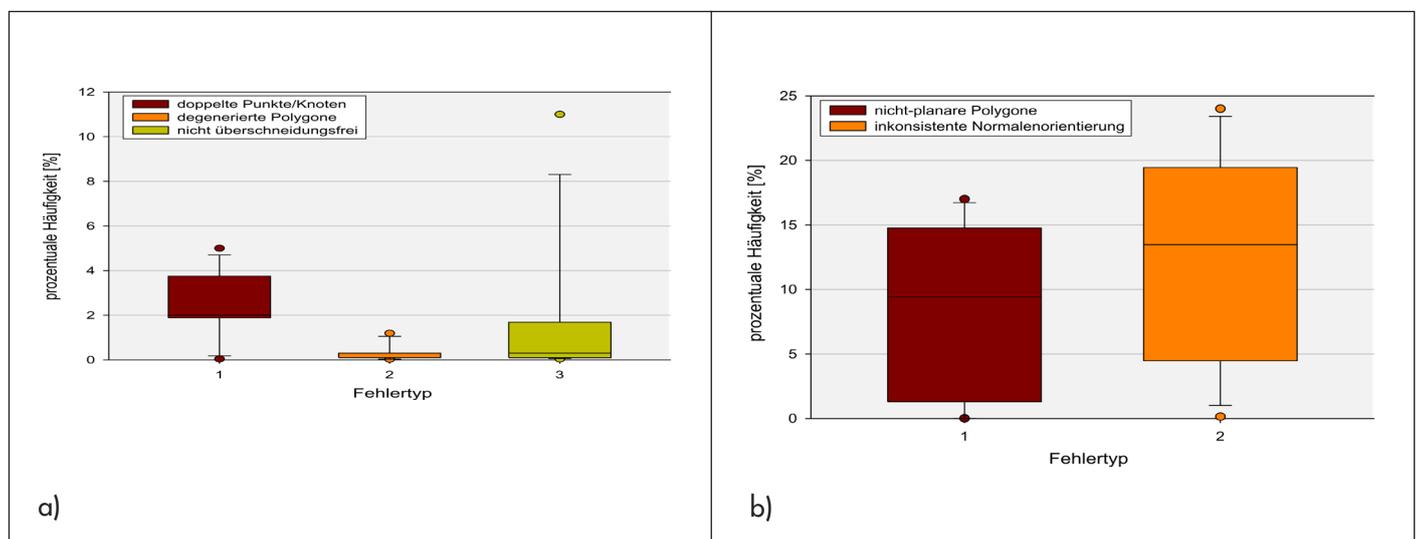
Die nachfolgende Evaluierung erfolgt auf Basis ausgewählter (anonymisierter) CityGML-Daten, welche von verschiedenen Städten aus der Ruhrgebiets-Region und vom Regionalverband Ruhr (RVR) zur Verfügung

Datensatz	Polygone	Gebäude	Polygone pro Gebäude	Texturen (in MB)	Dateigröße (in MB)	LoD
Datensatz 1	1292682	158150	8,17	0	3039,9	1
Datensatz 2	2472503	277371	8,91	0	1275,82	1
Datensatz 3	70362	7586	9,27	0	41,12	1
Datensatz 10	1877350	201838	9,30	0	5365,76	1
Datensatz 4	46363	5255	8,82	259,71	62,10	2
Datensatz 1	1602819	158135	10,13	8051,89	3039,97	2
Datensatz 5	2638	303	8,70	3,92	2,64	2
Datensatz 6	1903183	95855	19,85	0	841,33	2
Datensatz 7	13335398	1483990	8,98	3875,95	24653,22	2
Datensatz 10	1886898	201830	9,34	0	5365,76	2
Datensatz 8	42609	192	221,92	0	48,81	3
Datensatz 9	1366	35	39,03	25,54	1,47	3
Datensatz 10	378269	28925	13,07	284,35	5365,76	3

**Tabelle 1:** Tabellarische Darstellung zu den Kenngrößen der ausgewerteten CityGML-Datensätze.

gestellt wurden, sowie frei zugänglicher Testdaten, die sich bzgl. des LoDs unterscheiden (s. Tabelle 1) – die Datensätze 1 und 10 liegen in zwei respektive drei LoDs vor. Bei der Ausprägung der Daten nehmen der Datensatz 10 aufgrund der Anzahl texturierter Objekte, Datensatz 7 mit fast 1,5 Millionen Gebäuden und Datensatz 8 mit über 200 Polygonen pro Gebäude exponierte Positionen ein. Augenfällig ist zudem, dass im Bezug auf LoD 2 eine durchschnittliche Anzahl von nur 8-10 Polygonen pro Gebäude vorliegt (Datensätze 1, 2 und 7). Dies könnte ein Hinweis auf die im Abschnitt 3.3 thematisierte Ableitung der LoDs aus zweidimensionalen Grundrisskarten sein. LoD 2 wird aus den extrudierten Grundrissen (LoD 1) zumeist durch Synthese mit Sekundärdaten (z. B. Laserscandaten) abgeleitet. Hier sind signifikante Unterschiede in den zugrunde liegenden Abtastverfahren für die unterschiedlichen Detailgrade zu benennen, sodass die vorliegenden Daten aus Sicht der betrachteten Anwender als prototypisch zu betrachten sind.

Gemäß dieser Vorbemerkungen vermitteln die Abbildungen 6(a) und 7(a) die Ausprägungen der Fehler doppelter Punkte, degenerierte Polygone und nicht gegebene Überschneidungsfreiheit und Abbildungen 6(b) und 7(b) nicht-planarer Flächen und inkonsistente Normalenorientierung in prozentualer Häufigkeit, bezogenen auf Polygone. Zur Visualisierung der Ausprägung der Fehlerhäufigkeiten und -verteilungen erfolgen die Darstellungen in der Abbildung 6 als Box-und-Whisker-Plot (Pruscha, 2006) und in der Abbildung 7 als Bar-Plot der Mittelwerte, bezogen auf den LoD. Erkennbar ist, dass die durchschnittliche Häufigkeit der ersten Fehlergruppe unter vier Prozent liegt, für die zweite Gruppe bis zu 12 Prozent aufweist. Zudem zeigt der Box-und-Whisker-Plot die Inhomogenität der Datenqualität. Zur Einschätzung der prozentualen Werte sei angemerkt, dass im Falle eines ausgewählten Datensatzes ein Prozent mit ca. 100.000 fehlerhaften Polygonen korreliert. Sofern die Bewertung unter Beachtung des LoDs erfolgt, erscheint die Fehlerausprägung für die LoD 1 und 2 nahezu identisch, beim LoD 3 ist, bezogen auf alle Fehlerausprägungen, eine leichte Abnahme zu erkennen. Eine mögliche Ursache könnte darin begründet liegen, dass die LoD 1 und 2 vermehrt über automatische Verfahren (s. Abschnitt 3.1) erstellt werden und keine nachfolgende manuelle Begutachtung erfolgt. Bei einzelnen, sehr hoch detaillierten Objekten im LoD 3 (Points of Interest) ist vermutlich eine manuelle Erstellung verbreitet, wodurch sich die Fehleranzahl reduzieren lässt. Unter Beachtung des höheren manuellen Aufwandes im LoD 3 deutet die nur geringe Fehlerabnahme aber eventuell auch auf eine Problematik bei den Modellierungswerkzeugen hin. In diesem Zusammenhang ist auch die absolute Häufigkeit von Fehlern pro Gebäude zu beachten, welche



**Abbildung 6:** Statistische Ausprägung geometrischer Fehlertypen, (a) doppelte Punkte, degenerierte Polygone und nicht gegebene Überschneidungsfreiheit und (b) nicht-planare Flächen und inkonsistente Normalenorientierung.

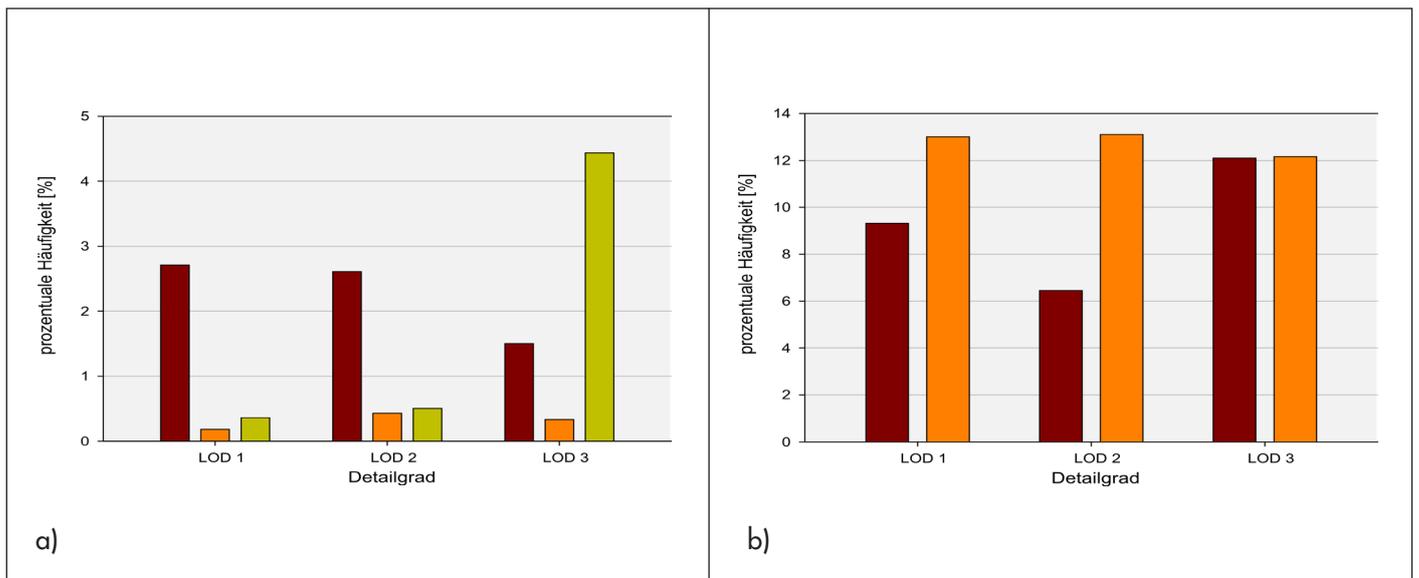


Abbildung 7: Statistische Ausprägung geometrischer Fehlertypen unter Berücksichtigung des Detailgrads (LOD).

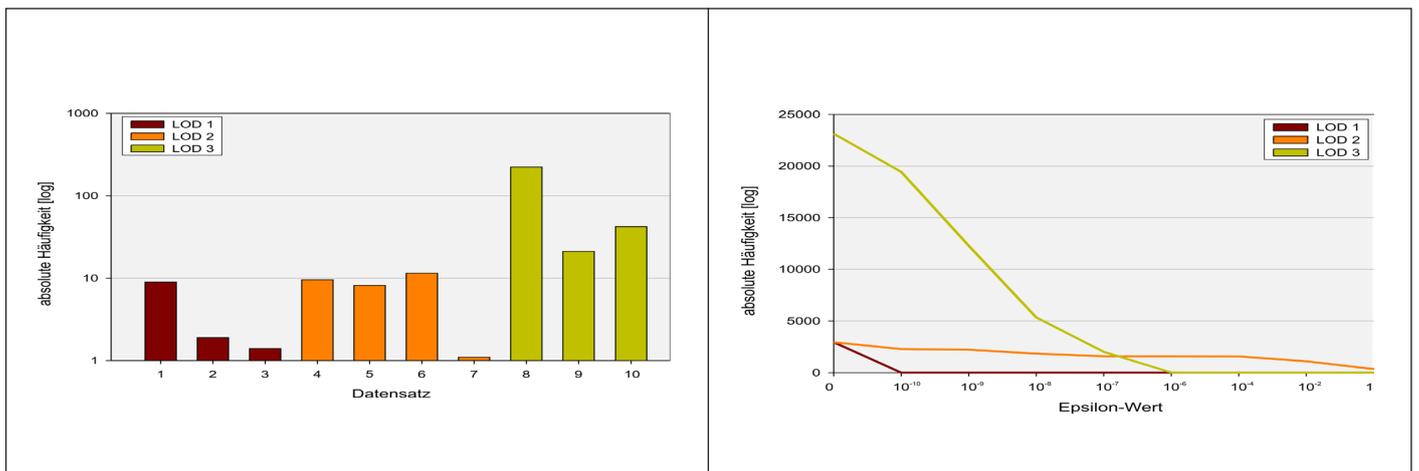


Abbildung 8: Statistik zur Fehlerhäufigkeit pro Gebäude

Abbildung 9: Fehleraufkommen unter Beachtung einer Genauigkeitsschwelle.

in der Abbildung 8 dargestellt wird. Erkennbar ist die deutliche Zunahme von Fehlern bei steigendem LoD – der Extremwert liegt bei über 200 Fehlern pro Gebäude. Dieser Sachverhalt ist insoweit kritisch zu sehen, da komplexere Simulationen auf CityGML-Daten auch einen höheren LoD benötigen, welche die Notwendigkeit eines ausgeprägteren Qualitätsstandards auch in höheren LoDs verstärkt.

Abbildung 9 bewertet schließlich die im Abschnitt 3.2 thematisierten Aspekte der Fehlerausprägung unter Beachtung einer Schwelle für das Planaritätskriterium. Prinzipiell zeigt sich das zu erwartende Verhalten, dass mit zunehmender, erlaubter „Ungenauigkeit“ die Fehleranzahl fällt. Aber auch bei dieser Statistik zeigt sich die Differenzierung der Fehlerausprägung zwischen den LoDs 1 und 2 gegenüber LoD 3. Bei hoch detaillierten Objekten scheint es deutlich schwieriger zu sein, eine genauere Rekonstruktion zu erstellen.

Neben der statistischen Ausprägung von Fehlern erlaubt auch die Manifestierung dieser im dreidimensionalen Modell einen Erkenntnisgewinn zur Beurteilung der Daten und stellt die Voraussetzung zur Korrektur der Fehler direkt im dreidimensionalen Modell dar. Eine exemplarische Visualisierung für fehlerhafte

Gebäude wurde einleitend in der Abbildung 1(b) gezeigt, welches einen ersten groben Überblick über die Gesamtzahl an Fehlern und deren Verteilung erlaubt.

## 5. DISKUSSION

Ausgehend von der zunehmenden Durchdringung von CityGML-Daten in verschiedenen Anwendungsbereichen, ist die Bereitstellung einer geprüften und möglichst fehlerfreien Datenbank eine grundlegende Notwendigkeit. Speziell Anwendungsbereiche, mit nachhaltiger Bedeutung, exemplarisch seien Evakuierungssimulationen und Solarpotenzialanalysen genannt, verlangen verlässliche Qualitätskriterien. Eine derartige Qualifizierung von Fortführungsdaten für 3D-Stadtmodelle, wie sie z. B. im Amtlichen Liegenschaftskataster-Informationssystem (ALKIS©) vorgesehen ist, liegt derzeit aber noch nicht vor. Dabei darf sich die Prüfung der Fortführungsdaten nicht nur auf die Schema-Validierung und/oder Sichtprüfung beschränken, es wird zunehmend wichtiger gemeinsame Mindeststandards hinsichtlich Modellierung, Inhalt und Qualität der 3D-Stadtmodelle zu beachten. Mögliche Abnehmer, wie Architekten, Immobilienwirtschaft oder Navigationssystemanbieter erwarten einheitlich strukturierte Daten, die über kommunale Grenzen hinweg angeboten werden (Städtetag NRW 2004).

Aus dieser Problematik heraus wurde in der vorliegenden Arbeit damit begonnen, wesentliche Bausteine für die Qualitätssicherung von CityGML-Daten bereitzustellen. Als ein wesentlicher Punkt gelang eine erste Typisierung von Fehler in die Klassen lexikographische, syntaktische und geometrische Fehler. Basierend auf den erarbeiteten Festlegungen und Methoden wurde eine Evaluierung auf ausgewählten CityGML-Daten durchgeführt. Es zeigte sich dabei, dass durchgängig von fehlerhaften bis sehr fehlerhaften Daten auszugehen ist. Auch lässt sich erkennen, dass die unterschiedlichen Erhebungssysteme vieler Dienstleister zur Bereitstellung von CityGML-Daten zu großen Inkonsistenzen führen und die Fehlerhäufigkeit mit dem LoD ebenfalls steigt.

Ein umfassendes Qualitätsmanagement erfordert zukünftig eine Reihe weiterer strukturierter Festlegungen. Gemäß dieser Zielsetzung hat die SIG 3D der GDI-DE damit begonnen, alle technischen und formalen Aspekte zu diskutieren und zusammenzufassen. Es ist daher auch eine Zielsetzung, die vorliegende Software zu einem Werkzeug zur Realisierung des durch die SIG 3D der GDI-DE aufzubauenden Qualitätsmanagements auszubauen, wodurch insbesondere folgende Konzepte im Fokus aktueller Entwicklungen sind:

- ▶ Anwender-konfigurierbare Prüfungen
- ▶ vollständige Implementierung aller Konformitätsanforderungen des normativen Teils der CityGML-Spezifikation
- ▶ Ermittlung von Kennzahlen für die Qualitätskontrolle
- ▶ WFS-T-Unterstützung zur wirtschaftlichen Fortführung von Primärdatenhaltungen.

Zusammenfassend lässt sich aus den Ausführungen klar ableiten, dass ein durchgreifendes Qualitätsmanagement für CityGML-Daten notwendig ist, welches erlaubt, Fehler automatisch in Datensätzen zu erkennen, da bei umfangreichen Datensätzen, wie sie im Fokus des CityGML-Kontexts stehen, eine nachträgliche manuelle Begutachtung nur bei ausgewählten Points of Interest möglich ist. Sofern die Möglichkeit der manuellen Begutachtung gegeben ist, sollte eine nachgeschaltete automatische Fehlerkorrektur erfolgen, ansonsten eine intuitive semi-automatische Korrekturmöglichkeit.

## DANKSAGUNG

Die Autoren möchten sich bei der Kooperation „ruhr3.de“ für die konstruktive Zusammenarbeit und bei den Kommunen des Ruhrgebiets für die Bereitstellung der Daten bedanken. In besonderer Form seien hier die Städte Bochum, Gelsenkirchen und Dortmund genannt.

## Quellen

- ABRAMOWSKI, S.; MÜLLER, H.: Geometrisches Modellieren. BI-Wissenschaftsverlag Mannheim, 1991.
- BAIMIN, A.; PAPAKONSTANTINOU, Y.; VIANU, V.: Incremental Validation of XML Documents, *ACM Transactions on Database Systems*, 2004, S. 100-140.
- BERG, M.; CHEONG, O.; KREVELD, M.; OVERMARS, M.: *Computational Geometry: Algorithms and Applications*. 3. Aufl., Springer, 2008.
- BENNER, J.; LEINEMANN, K.; LUDWIG, A.: Übertragung von Geometrie und Semantik aus IFC-Gebäudemodellen in 3D-Stadtmodelle. In: Beiträge zum 9. Symp. zur Rolle der Informationstechnologie in der Stadt- und Raumplanung sowie zu den Wechselwirkungen zwischen realem und virtuellem Raum, Wien (CORP 2004), Schrenk, M., 2004, S. 573-578.
- BORODIN, P.; NOVOTNI, M.; KLEIN, R.: Progressive Gap Closing for Mesh Repairing. In: VINCE, J. (Hrsg.); EARNSHAW, R. (Hrsg.): *Advances in Modelling, Animation and Rendering (Proceedings of the Computer Graphics International Conference 2002)*, 2002.
- BORODIN, P.; ZACHMANN, G.; KLEIN, R.: Consistent Normal Orientation for Polygonal Meshes. In: *Proc. of the Computer Graphics International Conference IEEE Computer Society*, 2004.
- CHEW, P.: Constrained Delaunay Triangulations. In: *Algorithmica* 4 (1989), S. 97-108.
- CZERWINSKI, A.; KOLBE, T.; PLÜMER, L.; STÖCKER-MEIER, E.: Interoperability and Accuracy Requirements for EU Environmental Noise Mapping. In: *InterCarto-InterGIS*, 2006, S. 182-194.
- FALKOWSKI, K.; EBERT, J.; DECKER, P.; WIRTZ, S.; PAULUS, D.: Semi-automatic generation of full CityGML models from images. In: *Geoinformatik 2009 Bd. 35*, Institut für Geoinformatik Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 4, 2009 (ifgi Prints), S. 101-110.
- GEIGER, J.: Data Quality Management: The most critical Initiative you can implement. In: *Twenty-Ninth Annual SAS Users Group International Conference*, 2004.
- GRÖGER, G.; COORS, V.: Regeln für valide GML Geometrie-Elemente in CityGML, Interne Arbeit der AG Qualität der SIG-3D, 2010.
- GRÖGER, G.; KOLBE, T.; CZERWINSKI, A.; NAGEL, C.: *OpenGIS City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard*. 2008.
- GRÖGER, G.; PLÜMER, L.: How to get 3-D for the Price of 2-D – Topology and Consistency of 3-D Urban GIS, *Geoinformatica*, 9. Jg., 2, 2005.
- GRÖGER, G.; PLÜMER, L.: How to achieve Consistency for 3D City Models, In: *Geoinformatica*, 14. Jg., 2010.
- KAZAR, B.; RAVI, K.; VAN OOSTEROM, P.; RAVADA, S.: On Valid and Invalid Three-Dimensional Geometries. In: Fendel, Oosterom, Penninga, Zlatanova (Eds.), *Advances in 3D Geo Information Systems*, Springer, 2008.
- KETTNER, L.: Designing a Data Structure for Polyhedral Surfaces. In: *Proc. 14th Annu. ACM Sympos. Comput. Geom*, 1998, S. 146-154.
- KOLBE, T.: CityGML, KML und das Open Geospatial Consortium. In: 13. Münchner Fortbildungsseminar Geoinformationssysteme, 2008.
- LEDOUX, H.; MEIJERS, M.: Extruding building Footprints to create topologically consistent 3D City Models. In: *Urban and Regional Data Management, UDMS Annuals*, 2009, S. 39-48.
- LEDOUX, H.; VERBREE, E.; SI, H.: Geometric Validation of GML Solids with the Constrained Delaunay Tetrahedralization. In: *Proceedings 4th International Workshop on 3D Geo-Information*, De Maeyer, P.; Neutens, T.; De Ryck, M. (eds.), 2009.
- PANTAZIS, D.: A conceptual Formalism for geographic Database Design. In: *Geographic Information Research*, 1997, S. 348-367.
- PRUSCHA, H.: *Statistisches Methodenbuch*. Springer Verlag, Berlin, 2006.
- SHEWCHUK, J.: Tetrahedral Mesh Generation by Delaunay Refinement. In: *SCG '98: Proceedings of the fourteenth annual Symposium on Computational Geometry*. New York, NY, USA : ACM, 1998, S. 86-95.
- STÄDTETAG NORD-RHEIN-WESTFALEN: 3D-Stadtmodelle, Orientierungshilfe. In: *Orientierungshilfe der AG 3D-Stadtmodelle des AK Kommunales Vermessungs- und Liegenschaftswesen des Städtetages Nordrhein-Westfalen*, 2004.
- VELEBA, D.; FELKEL, P.: *Survey of Errors in Surface Representation and their Detection and Correction*, 2007.

## IMPRESSUM // PUBLICATION INFORMATION:

GIS.SCIENCE – Die Zeitschrift für Geoinformatik ISSN 1430-3663 // Herausgeber: Dirk Schmidbauer // Redaktion: Alexandra Wojtanowska M.A., alexandra.wojtanowska@abcverlag.de, Tel. +49(0)221/96 08 536 // Hauptschriftleiter: Prof. Dr.-Ing. Ralf Bill, ralf.bill@uni-rostock.de, Tel. +49(0)381498-3200 // Editorial-Board: Prof. Dr. Lars Bernard, TU Dresden; Dr. Andreas Donaubauer, ETH Zürich; Prof. Dr. Max Egenhofer, University of Maine Orono; Prof. Dr. Manfred Ehlers, Universität Osnabrück; Prof. Dr. Klaus Greve, Universität Bonn; Dr. Stefan Lang, Universität Salzburg; Prof. Dr. Stephan Nebiker, Fachhochschule Nordwestschweiz; Prof. Dr. Matthäus Schilcher, TU München; Prof. Dr. Josef Strobl, Universität Salzburg // Konzeption und Layout: Dipl.-Des. Birgit Speiser // Leserservice: Ingrid Gimbel, ingrid.gimbel@abcverlag.de, +49 (0) 6221/75704-100 // GIS.SCIENCE erscheint im abcverlag GmbH, Waldhofer Str. 19, 69123 Heidelberg, Tel. +49(0)6221/75704-100, Fax +49(0)6221/75704-109, info@abcverlag.de // Geschäftsführung: Dirk Schmidbauer, HRB 337388, Ust-ID: DE 227 235 728 // Alle in der GIS.SCIENCE erscheinenden Beiträge, Abbildungen und Fotos sind urheberrechtlich geschützt. Reproduktion, gleich welcher Art, kann nur nach schriftlicher Genehmigung des Verlags erfolgen. © 2011 abcverlag GmbH, Heidelberg