

# 3D-Gebäude-Generalisierung

Frank Thiemann, Institut für Kartographie und Geoinformatik, Universität Hannover

## Zusammenfassung

Heute stehen immer mehr (semi-)automatische Werkzeuge und Techniken zur Verfügung, um effizient immer detailliertere 3D-Stadtmodelle zu erfassen. Mit der Verfügbarkeit dieser Daten stellt sich die Frage, wie man diese typischerweise großen Datenmengen behandeln, verändern, manipulieren und darstellen kann. Speziell bei der Visualisierung stellt das *level-of-detail*-Konzept (LOD) einen geeigneten Ansatz dar, um nur die Informationen darzustellen, die für die gewünschte Auflösung benötigt werden. Das Problem ist die automatische Herstellung einer solchen Multi-Scale-Darstellung von Gebäuden. Diese Ableitung ist ein Generalisierungsproblem.

In diesem Beitrag wird ein Konzept skizziert, das auf einer Konstruktiven-Körpergeometrie-Darstellung (CSG) der Gebäude beruht. Zuerst muss die komplexe Gebäudehülle in die CSG-Darstellung überführt werden, was eine Segmentierung des Gebäudes in seine relevanten Gebäudeteile einschließt. Dann kann ein Generalisierungsmechanismus auf dem CSG-Baum arbeiten. Abschließend werden die erzeugten *level-of-detail*-Informationen als Differenzen gespeichert.

## 1 Motivation

Dreidimensionale Landschafts- und Stadtmodelle erfreuen sich immer größerer Beliebtheit. Hauptanwendung solcher Modelle sind die Berechnung der Ausbreitung von Schall, von elektromagnetischen Wellen oder von Schadstoffen in der Luft. Telekommunikationsunternehmen benötigen 3D-Stadt-

modelle für die Planung ihrer Antennen und geben daher den Hauptantrieb zum Sammeln dieser Daten.

Neben diesen Rechenmodellen können 3D-Stadtmodelle auch zur visuellen Darstellung dienen. Zur Planung architektonischer Projekte kann es sinnvoll sein, die neuen Gebäude im Kontext der bestehenden Struktur (simuliert) darzustellen. Ein neues Feld ist auch die touristische Verwendung von Stadtmodellen. Zum einen sind virtuelle Stadtrundgänge möglich, zum anderen können diese Daten auch zur Navigation durch die Stadt herangezogen werden. Wie bereits in Japan vor Jahren vorgestellt, können Autonavigationssysteme mit 3D-Darstellungen angereichert werden, um eine angemessene Orientierungshilfe zu bieten.

Je nach Anwendung bestehen unterschiedliche Anforderungen an den Detaillierungsgrad der 3D-Modelle. Für architektonische Planungen werden gerne fotorealistische Darstellungen verwendet. Simulationen benötigen hingegen weniger komplexe Daten, vor allem um die Berechenbarkeit zu gewährleisten (Brenner 1999).

Um den unterschiedlichen Anforderungen gerecht zu werden, sollten solche Modelle mit unterschiedlichen Detaillierungen erhältlich sein. Die Echtzeit-Visualisierung von detaillierten 3D-Datenbeständen benötigt viel Zeit. Deshalb werden üblicherweise nur Modelle mit der minimal benötigten Auflösung für die Darstellung berechnet. Die Ableitung solcher verschiedener Modelle ist ein Generalisierungsproblem.

## 2 Grundlagen der 3D-Datenmodellierung

### 2.1 3D-Datenmodelle

Möglichkeiten der Modellierung von 3D-Objekten sind Randflächendarstellung, parametrische Be-

Deutsche Gesellschaft für Kartographie, Kartographische Schriften, Band 7: Visualisierung und Erschließung von Geodaten. Beiträge des Seminars GEOVIS 2003, 27.–28. Februar 2003, Hannover, 185–192

schreibungen, räumliche Aufzählungen oder Konstruktive Körpergeometrie.

*Räumliche Aufzählungen (Voxel, Raster):* Auch für räumliche Daten können Raster- und Vektorverfahren zur Modellierung herangezogen werden. Vergleichbar den Pixels im 2D kann ein 3D-Objekt aus kleinen Würfeln – den Voxels – zusammengesetzt werden. Auch gelten die gleichen Probleme wie in der 2D-Rasterwelt: Man benötigt große Datenmengen für nicht zu pixelig wirkende Visualisierungen.

*Parametrische Beschreibungen:* 3D-Objekte können gebildet werden, indem man Teile aus einem festen Satz an Grundkörpern (Quader, Zylinder, Pyramide, Kegel usw.) auswählt und positioniert bzw. kombiniert. Jeder Grundkörper kann über einige Parameter beeinflusst werden (beim Quader zum Beispiel Länge, Breite, Höhe). Diese Grundkörper können nun wie Bauklötze zusammengesetzt oder wie Mengen manipuliert werden (siehe auch CSG).

*Konstruktive Körpergeometrie (CSG, constructive solid geometry):* Ein Körper (Volumen) wird als eine Menge Raum aufgefasst. Er kann somit durch Mengenoperationen (zum Beispiel Vereinigung, Differenz oder Schnitt) aus anderen Körpern abgeleitet werden. Die Sequenz der Mengenoperationen wird in einem CSG-Baum gespeichert. Im engeren Sinne enthalten bei CSG die Blätter dieses Baumes nur einfache parametrisierte Grundkörper (siehe parametrische Beschreibungen). Im weiteren Sinne können beliebig beschriebene Körper durch Mengenoperationen kombiniert werden (also auch BRep und Raster).

*Randflächendarstellung (Brep, boundary representation):* Ein Gebäude kann über seine Randflächen beschrieben werden. Dazu wird die Oberfläche (bzw. Grenze) parametrisiert. Diese Form der Darstellung kann aus allen anderen Darstellungen erzeugt werden. Für die Visualisierung sind die Oberflächen von besonderer Bedeutung, da sie der sichtbare Teil des Körpers sind und zur Darstellung mit Texturen und Beleuchtungseffekten belegt werden.

Eine spezielle Form der Oberflächenbeschreibung ist ein unregelmäßiges Dreiecksnetz (TIN, *triangulated irregular network*). Die Körperoberfläche wird in viele kleine ebene Dreiecke zerlegt. Diese

werden über ihre Eckpunkte und Kanten parametrisiert. Größere ebene Flächen werden dadurch jedoch in mehrere kleinere Dreiecke zerlegt, abhängig von der Anzahl der Kanten.

Auch mit NURBS (*non-uniform rational B-splines*) findet eine Randbeschreibung statt. NURBS könnte man kurz als 3D-Splines beschreiben. Mit NURBS lassen sich fast alle beliebigen Flächen interpolieren. Für Gebäude ist diese aufwendige Darstellung allerdings nicht notwendig, da sie meistens nur von ebenen Flächen begrenzt werden.

Die meisten Gebäude lassen sich fast ausschließlich mit Ebenen – die restlichen unter Zunahme von Flächen zweiten Grades – beschreiben. In Thiemann (2001) wird ein Datenmodell vorgestellt, dass durch Mehrfachnutzung von Ebenengleichungen, Normalenvektoren und deren Parametern die grundlegenden Eigenschaften von Gebäudeflächen (zum Beispiel horizontal, senkrecht, rechtwinklig, parallel) direkt ins Datenmodell integriert.

## 2.2 Multi-Resolution-Modelle und level-of-detail-Konzept

Maßstabsabhängige Daten müssen in unterschiedlichen Auflösungen visualisiert und analysiert werden. Für jeden Abstand bzw. Maßstab ist ein anderer Grad der Generalisierung notwendig. Die Ableitung von vereinfachten bzw. generalisierten Modellen ist typischerweise zeitaufwendig, weil sie komplexe Geometrieoperationen enthält. Diese Operationen können daher meist nicht in Echtzeit erfolgen.

Beim *level-of-detail*-Konzept (LOD) werden für verschiedene Maßstäbe bzw. Abstände wenige verschieden stark vereinfachte Modelle gespeichert, die dann in Abhängigkeit vom gerade verwendeten Maßstab benutzt werden. Je nach Abstand wird das jeweils einfachste Modell ausgewählt, das die mindestens notwendige Auflösung bietet und somit Rechenzeit bei der Visualisierung gespart.

## 2.3 Popping-Effekt

Die oft sehr wenigen Modelle werden für größere Maßstabsbereiche verwendet, so dass die Unterschiede groß und deutlich wahrnehmbar sind. Beim Zoomen erscheinen oder verschwinden Details plötzlich, bekannt als Popping-Effekt. Diese abrupt-

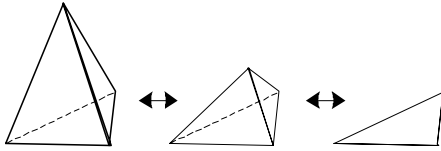


Abb. 1: Geo-Morphing: Das Zusammenziehen einer Kante zu einem Knoten, zweier Flächen zu je einer Kante und damit des Tetraeders zu einem Dreieck

ten Änderungen lenken die Aufmerksamkeit des Betrachters auf sich und wirken daher störend.

Zur Vermeidung des Popping-Effekts gibt es verschiedene Strategien:

- Es werden viele verschiedene Modelle erzeugt, so dass nur sehr kleine Unterschiede zwischen den Modellen auftreten.
- Durch *Morphing* – langsames Verformen, Skalieren, Verschieben und Drehen vom einen in den anderen Zustand – können fließende Übergänge erzeugt werden. Verschwindende Details können zu einer geringeren Dimension zusammengezogen werden. Umgekehrt gilt für erscheinende Objekte: Eine Kante kann zu einem Knoten, eine Masche zu einer Kante und ein Volumen zu einer Fläche verformt werden. Diese Methode ist als *Geo-morphing* bekannt. Die *progressive meshes* basieren ebenfalls auf dieser Strategie (Hoppe 1996).
- Sind die Unterschiede so groß, dass sich nicht mehr zuordnen lässt, welches Objekt aus welchem entsteht, lässt sich der Übergang mit keinem der beiden bereits vorgestellten Methoden sinnvoll animieren. Ein recht fließender Übergang kann jedoch durch Überblenden erreicht werden. Überblenden ist das Aus- und Einblenden durch zu- bzw. abnehmende Transparenz.

### 3 Grundlagen der 3D-Generalisierung

#### 3.1 Warum muss vereinfacht bzw. generalisiert werden?

Die Berechnung der Darstellung oder von Simulationen mit komplexen Modellen ist immer noch ex-

trem zeitaufwendig. So sind zum Beispiel für Echtzeitanwendungen die Berechnungen durch Reduzierung der Detailtreue und damit der Komplexität zu beschleunigen.

Beim automatischen Digitalisieren von Objekten, zum Beispiel durch Laser-Scanning, werden deutlich mehr Punkte erfasst als zur Beschreibung des Objektes notwendig wären. Durch Knoten-, Kanten- und Maschen-Reduzierungen können die Datenmengen drastisch reduziert werden, ohne an geometrischer Qualität zu verlieren. Die Computergraphik stellt dafür verschiedene Algorithmen bereit.

Sollen sehr detaillierte Gebäudemodelle vereinfacht werden, bei denen jedoch jeder Punkt zur Beschreibung der realen Geometrie notwendig ist, so können diese Algorithmen nicht ohne weiteres übernommen werden, sondern bedürfen der Erweiterung um bestimmte geometrische Bedingungen (Kada 2002).

Für viele Anwendungen, zum Beispiel Fahrsimulationen, virtuelle Stadtrundgänge, Visualisierungen von architektonischen Projekten, sind photorealistische Darstellungen erwünscht. Die Gebäude sollen optisch so echt wie möglich wirken. Dazu bedient man sich Fototexturen, die auf die Oberflächen projiziert werden.

Kartographen stellen an ihre Darstellungen weitere Anforderungen. Dabei wird ein Kompromiss zwischen bestmöglicher Detailtreue und bestmöglicher Lesbarkeit bei Erhaltung der relevanten In-

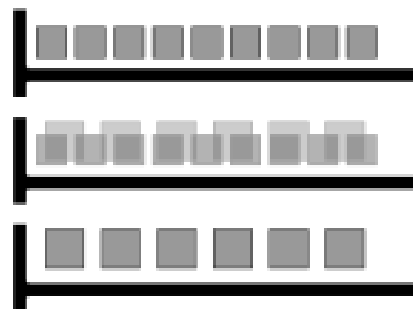


Abb. 2: Fading (van Kreveld 2001); neun Objekte der oberen Reihe werden in sechs Objekte der unteren Reihe überführt.

formationen und Verwerfung von Uninteressantem geschlossen. Objekte sollen entweder deutlich erkennbar sein oder müssen weggelassen werden.

Bei der kartographischen Generalisierung werden daher verschiedene Vorgänge angewendet. Zuerst wird thematisch generalisiert, indem bestimmte Objekte anhand ihrer Thematik selektiert oder weggelassen werden. Bei der geometrischen Generalisierung kommen neben Vereinfachen auch Betonen, Auswahl, Verdrängung, Zusammenfassung und Klassifizierung zum Einsatz (zum Beispiel *Shea* und *McMaster* 1989, *Hake*, *Grünreich* und *Meng* 2002).

### 3.2 Warum müssen skalierbare und selektierbare Darstellungen generalisiert werden?

Es stellt sich die Frage, warum interaktive Darstellungen überhaupt generalisiert werden müssen, obwohl der Benutzer sie so einfach beeinflussen kann. Es existieren flexible Möglichkeiten zum Zoomen auf Objekte und zum An- und Abwählen von angezeigten Informationen bzw. Details.

Um ein Objekt zu erkennen, muss man es zunächst identifizieren und lokalisieren. Dazu wird man sich üblicherweise mit einem großen Betrachtungsabstand einen Überblick verschaffen. Ohne Generalisierung könnte dabei jedoch das Objekt des Interesses bereits nicht mehr zu erkennen sein, weil es schon zu klein ist, um bei dem verwendeten Abstand bzw. Maßstab dargestellt zu werden. Dieses Problem lässt sich mit den Generalisierungsvorgängen *Betonen* und *Klassifizieren* lösen.

Zusätzlich soll der Benutzer die Möglichkeit haben, statische Abbildungen, wie zum Beispiel gedruckte Karten, Panoramen usw. zu erstellen. Bei statischen Abbildungen gibt es keine Möglichkeiten zum Zoomen und Selektieren, so dass für die Sichtbarkeit der benötigten Informationen bereits bei der Erstellung Sorge getragen werden muss.

### 3.3 3D-Vereinfachung und Generalisierung

Im Bereich der Visualisierung von meist als dreiecksvermaschten unregelmäßigen Netzwerken (TIN) vorliegenden 3D-Oberflächen werden vor allem Methoden zur Maschenvereinfachung benutzt.

(Übersichten bei *Hoppe* 1997, *De Floriani* und *Puppo* 1995, *Schmalstieg* 1997, *Schröder* 1992, *Heckbert* und *Garland* 1997) Die verschiedenen Techniken berücksichtigen hauptsächlich die geometrischen Eigenschaften, insbesondere die Größe von Objekten. Eine bloße Entscheidung auf Grund von geometrischen Parametern berücksichtigt jedoch nicht die relative Bedeutung des Objekts. Genau wie bei der Generalisierung in der Kartographie müssen Objekte nach ihrer Bedeutung und nicht nur in Abhängigkeit von ihrer geometrischen Größe generalisiert werden. Um semantische und geometrische Generalisierung zu integrieren, werden objektbasierte Methoden angewendet, die in wissensbasierten Systemen realisiert werden (*Mackaness* et al. 1997).

Ein System, das Regeln wie bei der kartographischen Generalisierung benutzt, wird in *Sester* und *Klein* (1999) beschrieben. *Mayer* (2000) benutzt Methoden der Bildverarbeitung (Maßstabsraum-Theorie) zur Generalisierung von Gebäuden. Gewöhnlich werden bei der Gebäudegeneralisierung drei verschiedene LOD benutzt, ein hochdetailliertes, ein Hüllquader als zweite Stufe und den Mittelpunkt als einfachste Stufe (zum Beispiel in *Coors* 2001, *Könniger* und *Bartels* 1998, *Kofler* 1998).

## 4 Ansatz zur 3D-Gebäudegeneralisierung

### 4.1 Szenario – Arbeitshypothese

Der Ansatz, der in diesem Beitrag präsentiert wird, basiert auf folgender Annahme: Es ist eine hochdetaillierte Darstellung eines Gebäudes gegeben. Die Daten wurden durch Feinmessung bestimmt oder aus Konstruktionsplänen entnommen. Ziel ist es, die Daten für einen virtuellen Stadtrundgang einzusetzen. Die Darstellung soll jedoch nicht fotorealistisch sein, sondern kartographischen Standards entsprechen. Neben Vereinfachungen durch Glättung und Weglassen kommen weitere Generalisierungsvorgänge wie *Betonen*, *Zusammenfassen* und *Klassifizieren* zum Einsatz. Dadurch kann auch *Verdrängung* erforderlich werden. Die Generalisierungsvorgänge benötigen Informationen über die Bedeutung der Objekte. Im Idealfall können diese Informationen den Attributen der Objekte entnom-

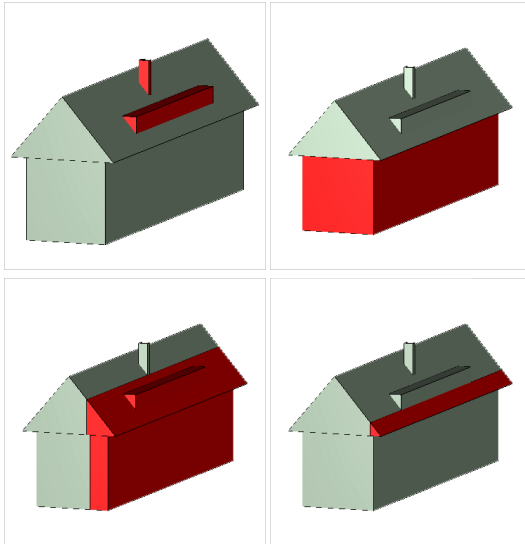


Abb. 3: Das Gebäude wird mit den Ebenen seiner Oberfläche geschnitten. (oben links: sinnvolle Zerlegung; unten

men werden. Meistens wird es jedoch erforderlich sein, die Bedeutung aus Geometrie (der Größe und Form) und der Topologie (den Beziehungen zur Nachbarschaft) abzuleiten.

Die Generalisierung von einzelnen Gebäuden kann nicht ohne Beachtung ihrer Umgebung geschehen. Ein einzeln stehendes Gebäude wird typischerweise anders generalisiert als Gebäude in offener oder geschlossener Blockbebauung. Das Hauptaugenmerk der Generalisierung liegt auf der Beachtung minimaler Ausmaße und der Erhaltung von wichtigen Eigenschaften. Die Methoden, die in diesem Beitrag vorgeschlagen werden, eignen sich zur Generalisierung einzelner Gebäude. Dies ist ausreichend, wenn man vom höchstdetailliertesten Modell zu einem Modell mittleren Details gelangen will. Bei weiteren Generalisierungen muss dann verstärkt auf Gruppierungen geachtet werden, vor allem im Kontext von Zusammenfassung und Typisierung.

## 4.2 Prozedur

Die vorgestellte Prozedur besteht aus den folgenden Schritten: Das Gebäude wird zunächst in seine elementaren Bestandteile zerlegt. Diese Teile werden unter Beachtung ihrer Bedeutung generalisiert.

Das Ergebnis der stufenweisen Generalisierung wird in einer Multi-Scale-Datenstruktur abgelegt. Im folgenden werden diese Schritte genauer erläutert.

### 4.2.1 Erkennung von Bestandteilen

Schornsteine, Balkone, Erker, Fenster, Türen und auch Dächer sind Gebäudebestandteile, die vortreten oder Löcher bilden. Diese Bestandteile (*features*) sollen erkannt und vom Hauptkörper des Gebäudes abgetrennt werden. Features können unter Umständen wiederum in kleinere Teile zerlegt werden (s. Abb. 3). Mit folgenden Methoden ist es möglich, zu einer Zerlegung zu gelangen:

1. Das Gebäude wird mit einer oder mehreren Ebenen seiner Oberfläche geschnitten. Sofern konkave Formen vorliegen, werden entweder überstehende Teile abgeschnitten oder konkave (hohle) Bereiche geschlossen. Die abgeschnittenen bzw. aufgefüllten Teile werden mit einer Testgröße bewertet. Die Testgröße ist der Quotient aus neuer und gesamter Oberfläche (*Heckbert et al. 2001*). Durch Abwandlung der Testgröße können auch die besonderen Eigenschaften von Gebäuden bei der Bewertung berücksichtigt werden.

$$\eta = \frac{\text{Schnittfläche}}{\text{Oberfläche des Teils}}$$

2. Dem Gebäude werden primitive Körper (wie zum Beispiel Prisma, Zylinder, Pyramide, Kegel) eingeschrieben, oder es wird mit diesen eingehüllt. Der bestangepasste Körper wird übernommen. In weiteren Iterationen werden die zu viel oder zu wenig bedeckten Teile behandelt. Versucht man, zunächst ein stehendes Prisma einzupassen, kann der Gebäuderumpf gefunden werden. Ein liegendes Prisma wird als erste Näherung für das Dach gesucht, weitere Prismen bilden Balkone, Erker, Schornsteine usw.

### 4.2.2 Ableitung einer CSG-Darstellung

Das Gebäude wird als eine Kombination aus Hauptkörper und Features modelliert. Die Teile werden mit Hilfe von Mengenoperationen kombiniert, insbesondere mit *Vereinigung* und *Differenz*. Die Folge der Operationen wird in einem CSG-Baum gespeichert. In Abbildung 4 ist dies



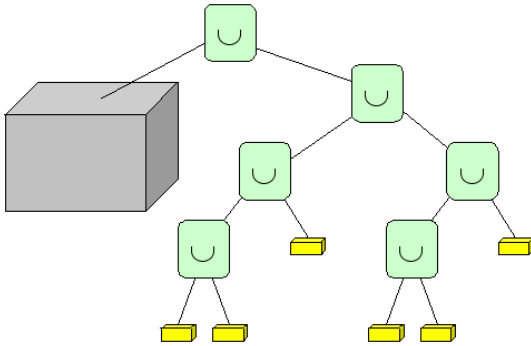


Abb. 4: CSG-Darstellung. Beschreibung des Gebäudes durch Vereinigung von Hauptkörper und Balkonen.

für ein einfaches Gebäude mit Balkonen skizziert. Das Gebäude ergibt sich, indem der Hauptkörper mit den Balkonen vereinigt wird.

Im Allgemeinen sind Mengenoperationen nicht umkehrbar. Nur für den Fall, dass sich die Teile nicht überlappen, sind Vereinigung und Differenz umkehrbar.

Wenn  $A \cup B = C$  und  $A \cap B = \emptyset$ , dann gilt  $C \setminus A = B$  und ebenso  $C \setminus B = A$ .

#### 4.2.3 Generalisierung

Mit einer lokalen und globalen Analyse wird entschieden, welche Teile vom Gebäude betont, vereinigt oder entfernt werden müssen. Diese Operationen müssen berücksichtigen, dass durch Betonen, Zusammenfassen und Klassifikation eine Verdrängung erforderlich werden kann. Die Analyse soll auf vorgegeben Grenzen für minimale Längen, Flächen und Volumen basieren, aber auch lokale Nachbarschaft berücksichtigen. Die CSG-Darstellung bietet dabei eine einfache Möglichkeit, die relevanten Bestandteile direkt anzusprechen. Die nutzbaren Operationen sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Unterschiedliche Grade der Generalisierung können durch Veränderung der Kontrollparameter (der Grenzwerte) erzielt werden.

#### 4.2.4 Speicherung der generalisierten Modelle

Als Ergebnis der Generalisierung liegt eine Folge von unterschiedlichen Modellen für unterschiedliche Maßstäbe vor. Um kontinuierliche Übergänge zu erhalten, sind viele verschiedene Modelle zu erzeugen. Anstatt jedes Modell einzeln zu speichern, werden die nur geringen Änderungen zwischen den Modellen gespeichert. Die Modelle werden durch sequenzielles Abarbeiten dieser differenziellen Datenstruktur berechnet. Die für *Morphing* und *Fading* notwendige Informationen stehen direkt zur Verfügung.

Abbildung 5 visualisiert dieses Konzept. Zwischen den unterschiedlichen Generalisierungsstufen (LOD) sind nur die Differenzen gespeichert, zum Beispiel Hinzufügen und Entfernen von Teilen.

Entwirft man diese Datenstruktur so, dass die Informationen ausgehend vom wenig detaillierten zum detaillierteren Level gespeichert werden, wird dadurch inkrementelles Übertragen bzw. Laden der Daten möglich. Die Daten müssen nur bis zum erforderlichen *level of detail* gelesen werden. Diese Technik ist aus der Bildverarbeitung bekannt, zum Beispiel bei MPEG. Sie werden auch für Vektorgraphiken vorgeschlagen, zum Beispiel in Bertolotto und Egenhofer (2000). Dadurch können geringere

Tab. 1: Nutzbare Operationen

Generalisierungs-Operation	Umsetzung unter Verwendung der CSG-Darstellung
Weglassen	Objekt entfernen
Verdrängung	Objekt verschieben
Betonen	Objekt vergrößern
Zusammenfassen	Mehrere Objekte durch ein Objekt ersetzen
Typifizierung	Ersetzen von m Objekten durch n Objekte ( $m > n$ )
Symbolisieren	Objekt durch ein stark schematisiertes Objekt (Symbol) ersetzen
Betonen	Objekt vergrößern

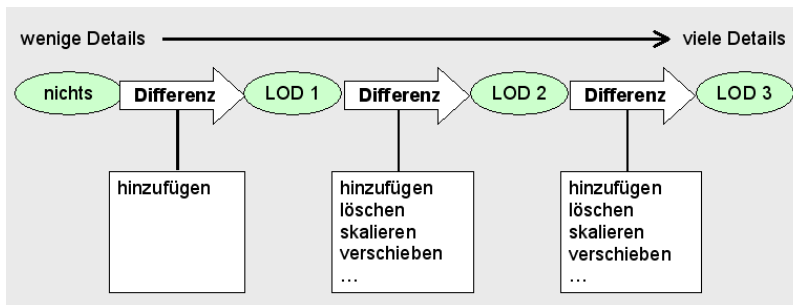


Abb. 5: Die differentielle Multi-Scale-Datenstruktur speichert nur die Differenzen zwischen den LOD.

Datenmengen übertragen werden, was besonders für mobile Anwendungen wichtig ist.

Für die Darstellung wird ein Datenmodell benötigt, das schnelle Wechsel zwischen benachbarten LOD erlaubt. Wenn man sich einem Objekt nähert, werden detailliertere Modelle benötigt. Entfernt man sich, kann wieder ein gröberes Modell benutzt werden. Die Visualisierung dieser Modelle muss in Echtzeit erfolgen können. Aus diesem Grund ist nur eine Randbeschreibung geeignet, da sie direkt die Oberflächen beschreibt, die von der Hardware dargestellt werden müssen.

Zur Analyse, Interpretation und Manipulation von 3D-Objekten ist hingegen eine CSG-Darstellung besser geeignet, insbesondere, wenn es zu Generalisierungsoperationen kommt. Zudem ist eine Konvertierung von CSG in eine Randbeschreibung jederzeit möglich. Die umgekehrte Konvertierung hingegen ist nicht trivial.

Der Wechsel zwischen zwei LOD soll durch *Geomorphing* geglättet werden. Um auch während des Morphings die Gebäudewandeneigenschaften (parallel, senkrecht, usw.) zu erhalten, müssen diese Eigenschaften als Bedingungen im Datenmodell enthalten sein. In Thiemann (2001) wird ein Randflächenmodell beschrieben, in dem diese Bedingungen implizit im Datenmodell enthalten sind.

## 5 Diskussion und Ausblick

In diesem Beitrag wird vorgestellt, wie aus hochdetaillierten 3D-Gebäudedaten eine kontinuierlich skalierbare Darstellung, basierend auf einem diffe-

rentiellen CSG-Modell, gewonnen werden kann. Zur schnelleren Darstellung kann das Modell in eine Randbeschreibung konvertiert werden.

Der nächste Schritt dieser Forschungsarbeit ist die Implementierung dieser Konzepte. Zunächst wird die Segmentierung umgesetzt. Dann folgt die automatische Generalisierung, basierend auf Schwellenwerten. Dann kann untersucht werden, wie viele verschiedene LOD für verschiedene Situationen notwendig sind.

Abschließend soll die Generalisierung benachbarter Gebäude, von Gebäudeblöcken und größeren bebauten Gebieten untersucht werden. Dort treten weitere Probleme auf, wie zum Beispiel die Definition eines vereinfachten Daches von zwei zusammengefassten Gebäuden.

## 6 Literatur

- Bertolotto, M., Egenhofer, M. (1999): Progressive vector transmission. In: Transactions of the ACMGIS99, Kansas City, MO, 152–157.
- Brenner, C. (1999): Interactive modelling tools for 3D building reconstruction. In: Photogrammetrische Woche 99, Fritsch, Spiller (eds.), Wichmann, Heidelberg, 23–34.
- Coors, V. (2001): Feature-preserving simplification in Web-based 3D-GIS. In: 1st International Symposium on Smart Graphics. <http://www.dfki.de/~krueger/sg2001/>
- De Floriani, L., Puppo, E. (1995): Hierarchical triangulation for multiresolution surface description. ACM Transactions on Graphics 14(4), 363–41.
- Hake, G., Grünreich, D., Meng, L. (2001): Kartographie. De Gruyter Verlag.

- Heckbert, P., Ribelles, J., Garland, M., Stahovich, T., Srivastava, V. (2001): Finding and removing features from polyhedra. In: Proceedings of DETC'01.
- Heckbert, P., Garland, M. (1997): Survey of polygonal surface simplification algorithms. Technical report, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Multi-resolution Surface Modeling Course SIGGRAPH 1997. <http://www.cs.cmu.edu/~ph/>
- Hoppe, H. (1997): View-dependent refinement of progressive meshes. Computer Graphics (SIGGRAPH '97 Proceedings), 1997, 189–198.
- Kada, M. (2002): Automatic generalisation of 3D building models. ISPRS Vol. 34, Part 4, GeoSpatial Theory, Processing and Application, Ottawa, Canada.
- Kofler, M. (1998): R-trees for visualizing and organizing large 3D databases. Dissertation, Universität Graz.
- Könninger, A., Bartel, S. (1998): 3D-GIS for urban purposes. GeoInformatica, Vol., Nr. 1, 79–103.
- Van Kreveld, M. (2001): Smooth generalization for continuous zooming. In: Proceedings of the ICC, Peking, China, 2001.
- Lehto, L., Kilpeläinen, T. (2000): Real-time generalization of geodata in the WEB. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 33, Part B4, ISPRS, Amsterdam, 559–566.
- Mayer, H. (2000): Three dimensional generalization of buildings based on scale-spaces. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 33, Part B4, ISPRS Amsterdam.
- Mackaness, W., Weibel, R., Buttenfield, B. (1997): Report of the 1997 ICA workshop on map generalisation. Publication of the ICA Working Group on Map Generalisation, Gävle, Schweden. <http://www.geo.unizh.ch/ICA/docs/gaevle1997/report.html>
- Schmalstieg, D. (1997): Lodestar - An octree-based level of detail generator for VRML. In: Proceedings of SIGGRAPH Symposium on VRML.
- Schröder, W. J., Zarge, J. A., Lorensen, W. E. (1992): Decimation of triangle meshes. Computer Graphics, 26, July 1992, 65–69.
- Sester, M., Klein, A. (1999): Rule-based generalization of buildings for 3D-visualization. In: Proceedings of the International Cartographic Conference (ICA), Ottawa.
- Shea, K., McMaster, R. (1989): Cartographic generalization in a digital environment: when and how to generalize. In: Ninth International Symposium on Computer-Assisted Cartography, Baltimore, Maryland, 56–67.
- Thiemann, F. (2001): Parametrisierung, Modellierung und Ausgleichung von 3D Gebäudedaten für das Facility-Management. Diplomarbeit, Institut für Geodäsie und Geoinformation, Technische Universität Berlin.