

# 3D Generalisierung für die Echtzeitvisualisierung von Landschaftsmodellen

MARTIN KADA\*

*Dieser Artikel präsentiert einen automatischen Ansatz zur Generalisierung von 3D-Gebäudemodellen mit dem Schwerpunkt auf der Visualisierung von urbanen Landschaften. Die vereinfachten Versionen solcher Modelle werden nicht nur für Level of Detail Strukturen in der Echtzeitvisualisierung benötigt, sondern auch für Web-basiertes 3D-GIS und für die Präsentation auf mobilen Endgeräten. Die dargestellte Lösung basiert auf einer Ausgleichung nach kleinsten Quadraten und einer wohl durchdachten Menge von Klassifizierungs- und Simplifizierungsoperationen für Flächen. Das Konzept erlaubt die Integration von Regelmäßigkeiten zwischen Gebäudeflächen in das Modell, welche für den visuellen Eindruck wichtig sind. Diese Regelmäßigkeiten bleiben dann im Verlauf des Generalisierungsprozesses streng erhalten.*

## 1 Einleitung

In den letzten Jahren war die Entwicklung von Werkzeugen für die effiziente Erfassung von 3D-Stadtmodellen Gegenstand intensiver Forschung. Neben den Digitalen Höhenmodellen und 3D-Daten von Straßen und urbaner Vegetation sind Gebäudemodelle der wichtigste Bestandteil solcher Modelle. Mittlerweile sind Algorithmen für die automatische und halbautomatische Erfassung von 3D-Gebäudemodellen verfügbar. Abb. 1 zeigt beispielhaft ein 3D-Modell von Stuttgart, welches mit dem Verfahren von HAALA UND BRENNER (1999) erfasst wurde. Einen guten Überblick über den derzeitigen Stand der Technik, die experimentellen Systeme und die kommerziellen Softwarepakete gibt z.B. BALTSAVIAS, GRÜN UND VAN GOOL (2001). Fast jedes System beschreibt dabei das rekonstruierte Gebäude als allgemeines Polyeder, da die Repräsentation mittels Flächen und Kanten für die meisten Anwendungsfälle ausreicht.

Nachdem zunächst Ausbreitungssimulationen der Hauptanwendungsbereich von 3D-Gebäudemodellen war, hat sich der Schwerpunkt hin zur Visualisierung verlagert. Unserer Meinung nach ist eine der wichtigsten Antriebskräfte für den Einsatz von 3D-Stadtmodellen die weitverbreitete Nutzung von mobilen Endgeräten für ortsbezogene Dienste. Leistungen wie Personennavigation oder Telepointing, d.h. die Abfrage räumlicher Information über das Zeigen auf Objekte, setzen eine realistische Darstellung der urbanen 3D-Umgebung auf dem mobilen Endgerät voraus. Aufgrund der eingeschränkten Rechenleistung und Displays einerseits und der enormen Datenmenge eines 3D-Stadtmodells andererseits muss die Informationsdichte, welche verarbeitet, verwaltet und präsentiert werden soll, auf effiziente Weise reduziert werden. Die in diesem Artikel beschriebene Generalisierung von 3D-Gebäudemodellen ist daher von bedeutendem Interesse.

Der Generalisierungsprozess setzt im Allgemeinen eine Elimination unwichtiger Details voraus, wobei die für den visuellen Eindruck wichtigen Merkmale zu bewahren sind. Für künstliche Objekte wie Gebäude sind Symmetrien von besonderer Bedeutung. Aus diesem Grund werden reguläre Strukturen wie parallele Kanten, rechtwinklige Schnittwinkel und planare Dachflächen während der Generalisierung erhalten. Grundsätzlich ist diese geometrische Regularisierung auch während der Datenerfassung erforderlich, da ansonsten während der Mes-

---

\* Dipl.-Inf. Martin Kada, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str. 24D, 70174 Stuttgart; Email: [martin.kada@ifp.uni-stuttgart.de](mailto:martin.kada@ifp.uni-stuttgart.de); <http://www.ifp.uni-stuttgart.de>



Abb. 1: 3D-Stadtmodell von Stuttgart.

sung geometrische Fehler eingeführt werden, die dann in fehlerhafte Gebäudestrukturen resultieren. Im Vergleich zur Erfassung, wie beispielsweise in GRÜN UND WANG (2001) beschrieben, verschärft sich dieses Problem wegen der zunehmenden Abweichung von der echten Gebäudegeometrie für den Generalisierungsprozess.

## 2 Stand der Forschung

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung von Verfahren zur automatischen Vereinfachung von aus Polyeder bestehender Gebäudemodelle. Während die Generalisierung, z.B. von Gebäudegrundrissen eine typische Domäne der Kartographie ist, wird die Flächensimplifizierung in der Computer Vision verwendet um die Visualisierung von hochkomplexen Modellen zu beschleunigen. In unserer Arbeit werden Ansätze aus beiden Bereichen kombiniert. Diese Ansätze sollen im folgenden kurz beschrieben werden.

### 2.1 Modellgeneralisierung

Modellgeneralisierung ist die Vereinfachung von Objektrepräsentationen bezüglich Geometrie, Topologie und Semantik. Der Umriss eines Gebäudes wird in einem frühen Ansatz von STAUFENBIEL (1973) durch die Schnittpunkte gerader Linien beschrieben. Durch Regeln ist bestimmt, wie mit Linien zu verfahren ist die zu klein für die Präsentation sind. In aktuelleren Ansätzen werden objektorientierte Strukturen und Regeln verwendet um eine ganzheitliche Lösung zu erhalten. BARRAULT ET AL. (2001) präsentieren beispielsweise ein Multi-Agentensystem, in dem jeder Agent die Gesamtsituation eines Hauses unter Beibehaltung

beigefügter Zwangsbedingungen verbessert. Die Regeln fordern oftmals minimale Gebäudegrößen, rechte Winkel und das Betonen von schmalen Objekten innerhalb des Gebäudes. Ein Konzept zur Vereinfachung von Gebäudegrundrissen mittels einer Ausgleichung nach kleinsten Quadraten wurde zuerst von SESTER (2000) eingeführt. Dieser Ansatz erlaubt die Einführung von Beobachtungen in Form von Bedingungen um die unbekannt Parameter durch einen Optimierungsprozess zu bestimmen.

Weiterhin wurden in den letzten Jahren Methoden zur Generalisierung von 3D-Gebäudedaten vorgeschlagen. MEYER (2000) verwendet eine Sequenz von Öffnen-, Schließen- und Rektifizierungsoperatoren um eine Level of Detail Struktur zu erhalten. COORS (2000) erweitert einen bekannten Algorithmus zur Flächensimplifizierung (von GARLAND UND HECKBERT (1997)) um signifikante Merkmale eines Modells zu betonen und wichtige zu aggregieren.

## 2.2 Flächensimplifizierung

In den Bereichen der Computergrafik, Computer Vision und Computational Geometry wurden eine Reihe von Algorithmen zur Flächensimplifizierung entwickelt. Einen guten Überblick bietet die Studie von HECKBERT UND GARLAND (1997). Die wichtigsten Algorithmen verwenden entweder Vertex-Clustering- oder Edge-Collapse-Operatoren um allgemeine Objekte zu vereinfachen. Der Algorithmus von ROSSIGNAC UND BORREL (1993) teilt das Oberflächenvolumen eines Objekts in ein reguläres, dreidimensionales Raster auf um alle Knoten innerhalb einer Zelle zu einem einzigen Knoten zu vereinigen. Das vereinfachte Modell wird anschließend aus den verbleibenden Knoten entsprechend der originalen Topologie synthetisiert. HOPPE (1996) und GARLAND UND HECKBERT (1997) verwenden Edge-Collapse-Operationen um iterativ Kanten zusammenzuziehen. Sie unterscheiden sich jedoch in ihrem zugrundeliegenden Fehlermaß, welche den eingeführten, geometrischen Fehler im Modell beschreibt. Ein weiterer interessanter Ansatz für polygonale Modelle beschreibt RIBELLES ET AL. (2001). Kleine Merkmale wie Unebenheiten, Löcher, Kerben und Verzerrungen werden erkannt, gewichtet und mittels eines Teilungs- und Fülloperators entfernt.

Bisher wird bei der Flächensimplifizierung ausschließlich die geometrische Differenz beachtet, z.B. der Abstand der generalisierten Knoten zur originalen Fläche. Dabei werden alle Bereiche des Modells gleich behandelt, d.h. es wird nicht in bedeutende oder unbedeutende Regionen unterschieden. Des Weiteren wurden auch die Regelmäßigkeiten von Gebäuden in diesem Zusammenhang noch nicht verwendet.

## 3 Überblick über den Algorithmus

Der präsentierte Generalisierungsalgorithmus wurde für polygonale dreidimensionale Gebäudemodelle entwickelt. Diese Modelle bestehen aus einer Menge von Knoten und einer Menge von polygonalen Flächen. Jede dieser Flächen verfügt optional über zusätzliche innere Punkte, welche die Parameter der zugehörigen ebenen Flächen mit festlegen. Die inneren Punkte werden bei der Datenerhebung geliefert, z.B. durch Stereomessung oder fallen während der Simplifizierung des Gebäudemodells an. Der Algorithmus verwendet diese inneren Punkte in einer Ausgleichung um die nach jedem Generalisierungsschritt verbleibenden Knoten neu zu berechnen. Dadurch wird die minimale Abweichung des generalisierten Gebäudemodells zu den Knoten im Originalmodell und damit zu der originalen Form gewährleistet.

Unser Algorithmus basiert auf der Beobachtung, dass die meisten Wände parallel zu den Hauptachsen des Gebäudes orientiert sind, welche oftmals wiederum im rechten Winkel zueinander stehen. Man kann daher davon ausgehen, dass Flächen im Modell koplanar, parallel oder rechtwinklig zu anderen Flächen im selben Modell sind. Derartige Informationen sind

jedoch normalerweise nicht explizit in einem Gebäudemodell repräsentiert. Daher wird in einem ersten Schritt das Gebäudemodell auf diese Eigenschaften hin untersucht und die gefundenen Eigenschaften in das Gebäudemodell integriert. Diese Gebäudeeigenschaften werden durch die nachfolgenden Generalisierungsschritte nicht verletzt, manche werden jedoch im Verlauf der Simplifizierung überflüssig.

Nach der Integration der Zwangsbedingungen in das Gebäudemodell wird die Geometrie iterativ simplifiziert. Der Algorithmus sucht nach Merkmalen wie Aus-, Einbuchtungen, Aussparungen, Spitzen usw. und bewertet deren Signifikanz aufgrund des allgemeinen Erscheinungsbildes. Im nächsten Schritt werden dann die Merkmale mit der geringsten Signifikanz entfernt, d.h. diejenigen Merkmale, welche die Silhouette des Gebäudemodells nur geringfügig beeinflussen. Dieser Generalisierungsschritt verändert nicht nur die Gebäudegeometrie, sondern auch die Zwangsbedingungen zwischen den von der Simplifizierung betroffenen Flächen. Parallele Flächen können nach der Simplifizierung beispielsweise koplanar werden und lassen sich daher oftmals anschließend zusammenfassen. Knoten, die durch die Simplifizierung aus der Geometrie entfernt wurden, werden nicht einfach aus dem Modell herausgenommen, sondern ihre Koordinaten werden als zusätzliche innere Punkte in den Flächen gespeichert. Im letzten Schritt der Generalisierung werden die neuen Positionen der verbleibenden Knoten unter Berücksichtigung der noch bestehenden Zwangsbedingungen mittels einer Ausgleichung nach kleinsten Quadraten berechnet

## 4 Gebäudemodell mit Zwangsbedingungen

Im ersten Schritt der Generalisierung werden Zwangsbedingungen zwischen den Gebäudeflächen aufgestellt. Diese Bedingungen beschreiben die Lage der Flächen zueinander, z.B. ob Flächen koplanar, parallel oder rechtwinklig zueinander sind. Der Simplifizierungsschritt des Algorithmus beachtet diese und verändert die Position der Knoten so wenig wie möglich. Die sich anschließende Ausgleichung optimiert die verbleibenden Knoten unter Berücksichtigung der Zwangsbedingungen. Die Qualität des endgültigen, generalisierten Gebäudemodells ist damit abhängig von den gefundenen Zwangsbedingungen.

Für jede Fläche lässt sich aus den Koordinaten der Knoten und der inneren Punkte eine eindeutige Ebene berechnen. Die Lage der Gebäudeflächen zueinander lässt sich anschließend mit Hilfe der Normalenvektoren der Ebenengleichungen wie folgt automatisch bestimmen:

**Koplanarität:** Zwei Flächen werden als koplanar angesehen, wenn der Winkel zwischen deren Normalenvektoren nahe  $0^\circ$  oder  $180^\circ$  ist und die Differenz der absoluten Werte der Abstände unter einer gegebenen Toleranz liegen.

**Parallelität:** Zwei Flächen werden als parallel angesehen, wenn der Winkel zwischen den Normalenvektoren nahe  $0^\circ$  oder  $180^\circ$  ist.

**Rechtwinkligkeit:** Zwei Flächen werden als rechtwinklig angesehen, wenn der Winkel zwischen ihren Normalenvektoren nahe  $90^\circ$  ist.

Es ist unsere Überzeugung, dass nicht alle Zwangsbedingungen durch einen automatischen Ansatz gefunden werden können. Abhängig von der Qualität der Eingabemodelle und der bei der Erzeugung der Modelle eingeführten Fehler werden immer einige Bedingungen nicht entdeckt. Eine hohe Anzahl fehlender Zwangsbedingungen kann die Qualität des endgültigen Modells vermindern. Eine Anwendung sollte daher die Möglichkeit bieten, Zwänge halbautomatisch zu identifizieren und einzufügen um die Gesamtqualität der generalisierten Modelle

zu verbessern. Ein halbautomatisches Werkzeug hilft ferner die Effekte bestimmter Zwangsbedingungen zu studieren, indem Bedingungen manuell eingefügt und entfernt werden.

## 5 Erkennen und Entfernen von Merkmalen

Die Geometrie eines Gebäudemodells darf nicht durch willkürliches Entfernen von Kanten oder Knoten simplifiziert werden. Auch wenn der dadurch eingeführte geometrische Fehler klein ist, so wird die Symmetrie des Gebäudemodells unwiederbringlich gestört. Es ist daher notwendig, spezielle Operatoren zu verwenden, welche die Regelmäßigkeiten des Modells während der Simplifizierung beachtet. Unser Algorithmus erkennt und entfernt vollständig Merkmale unter Verwendung verschiedenartiger Simplifizierungsoperatoren, wobei jeder Operator für die Entfernung einer speziellen Klasse von Merkmalstypen entwickelt wurde. Im Vergleich zu den primitiven Operatoren aus dem Bereich der Flächensimplifizierung bleibt die Integrität der verbleibenden Gebäudemodelle in unserem Ansatz erhalten. Wir unterscheiden zwischen drei Merkmalstypen aufgrund des zugrunde liegenden Primitivtyps: die Ausbuchtung, die Kerbe und die Spitze (Abb. 2).

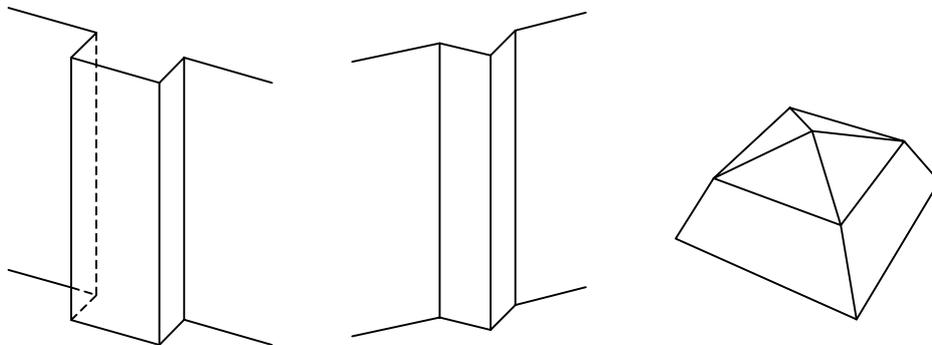


Abb. 2: Die Merkmalerkennung unterscheidet zwischen flächen-, kanten- und knotenbasierten Merkmalen: z.B. (a) Ausbuchtung, (b) Kerbe und (c) Spitze.

Der Algorithmus erkennt Merkmale, indem er alle Primitive eines Gebäudemodells auf das Vorhandensein eines bestimmten Merkmalstyps testet. Sobald ein Merkmal erkannt wurde, wird der Einfluss auf die Silhouette des Gebäudemodells ermittelt. Dies kann ein sehr komplizierter Prozess sein, da kleine Merkmale aufgrund ihrer semantischen Bedeutung wichtig sein können. Zur Zeit verwenden wir eine einfache Metrik um die Qualität der Symmetrien zu messen. Diese Metrik bestimmt die maximale Distanz, die ein Knoten während der Entfernung einer kompletten Ausbuchtung verschoben wird.

Anschließend entfernt der Algorithmus die Merkmale mit dem geringsten Einfluss auf das Gebäudemodell. In unserem Beispiel werden Ausbuchtungen durch eine Kombination von Edge Collapse und Kantenverkürzungsoperationen entfernt (Abb. 3). Danach überprüft der Algorithmus die Gültigkeit der Zwangsbedingungen zwischen den verbleibenden Flächen und aktualisiert diese aufgrund deren neuen Beschaffenheit.

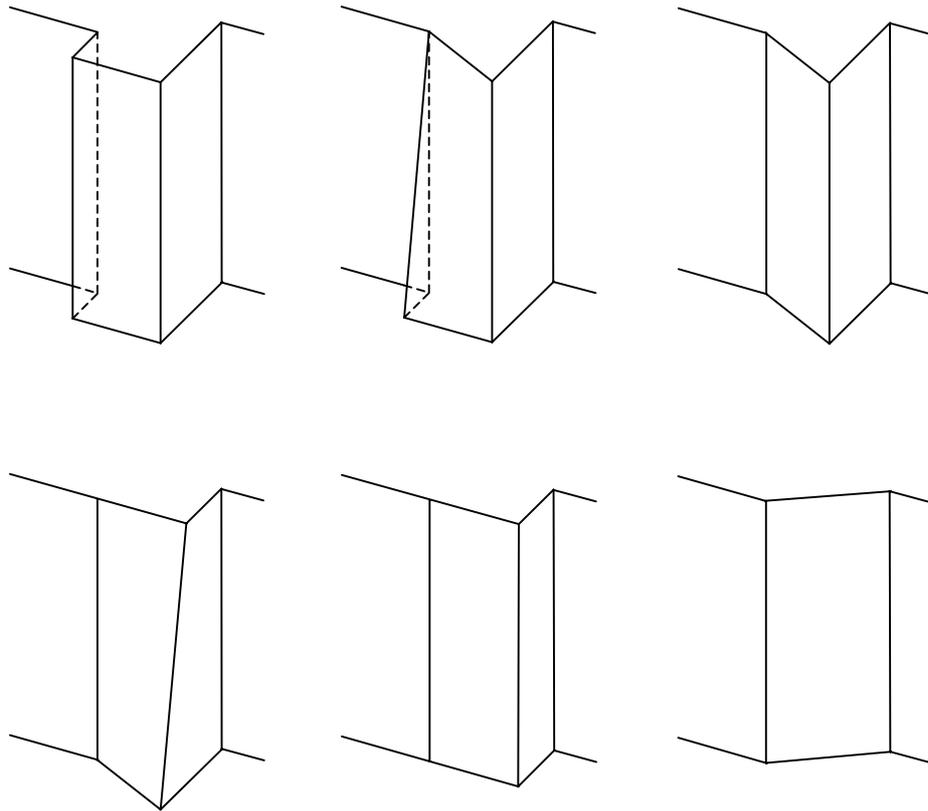


Abb. 3: (a-e) Entfernung einer Ausbuchtung: Die Endpunkte der kurzen Kanten werden mittels einer Edge Collapse Operation zu einem Punkt zusammengeführt (b+c), während die längeren Kanten um dieselbe Länge verkürzt werden (d+e). Die Anwendung von Edge Collapse Operationen auf alle Kanten der Ausbuchtung würde zuviel Geometrie entfernen (f).

## 6 Parameterschätzung

Nach dem Entfernen von Gebäudemerkmalen muss die optimale Form des reduzierten Modells neu bestimmt werden. Die neue Form soll durch alle ursprünglichen Punkte beeinflusst werden, auch wenn sich die Anzahl der planaren Flächen durch den vorgegangenen Schritt verringert hat. Daher wird eine Ausgleichung nach kleinsten Quadraten auf die verbleibenden Flächen angewendet, in der alle Punkte des Originalmodells sowie die gegenwärtig bestehenden Zwangsbedingungen zwischen den Flächen mit in den Optimierungsprozess eingehen.

Die optimierte Position der verbleibenden Modellknoten ergibt sich durch den Schnitt von drei oder mehr Flächen. Um eine vollständige Lösung zu erhalten, werden zusätzlich zu den planaren Flächen auch deren Schnittpunkte in die Ausgleichung mit integriert. Dieser Ansatz lässt sich damit begründen, dass die topologische Information über die Schnitte der planaren Flächen bisher noch nicht verwendet wurde. Würde diese Information ignoriert, so wäre nicht gewährleistet, dass sich vier oder mehr planare Flächen nach der Generalisierung in einem eindeutigen Punkt schneiden. Durch die Verwendung unterschiedlicher Gewichtungen für jeden Typ von Zwangsbedingungen lässt sich auf die Ausgleichung Einfluss ausüben, z.B. um eindeutige Schnittpunkte den Vorzug gegenüber parallelen Flächen zu geben.

## 7 Diskussion

Der oben beschriebene Algorithmus wurde implementiert und mit polygonalen Gebäudemodellen getestet. Die Komplexität der Modelle wurde über die Anzahl der Dreiecke nach einer Triangulierung des Modells gemessen. Der Algorithmus erreichte viel versprechende Ergebnisse sowohl für komplexe als auch für einfachere Gebäudemodelle. Das Modell des Stuttgarter Neuen Schlosses besteht beispielsweise aus 2730 Dreiecken. Unser Algorithmus konnte 110 Ausbuchtungen in drei Iterationen im Modell erkennen und entfernen und somit das Modell auf 1827 Dreiecke vereinfachen. Die Ergebnisse sind in Abb. 4 bis Abb. 7 dargestellt. Die Koplanarität, Parallelität und Rechtwinkligkeit der verbleibenden Flächen wurde dabei sichtbar erhalten. Für eine Visualisierung reicht dieser Detaillierungsgrad des texturierten Modells in den meisten Fällen aus.

Der vorgestellte Algorithmus generalisiert automatisch 3D-Gebäudemodelle, indem er primitive Merkmale wie z.B. Ausbuchtungen erkennt und entfernt. Eine anschließende Ausgleichung optimiert die Lage der verbleibenden Gebäudeknoten unter Beibehaltung der Regelmäßigkeiten und Symmetrien des Gebäudes. Zukünftige Arbeiten werden sich mit der Erkennung und Entfernung weiterer Merkmalstypen auseinandersetzen, so dass auch komplexere Merkmale behandelt werden können. Besonders Merkmale, die auf Kanten und Knoten basieren, wurden bisher noch nicht behandelt. Weiterhin soll auch untersucht werden, wie sich gekrümmte Gebäudeelemente simplifizieren lassen.

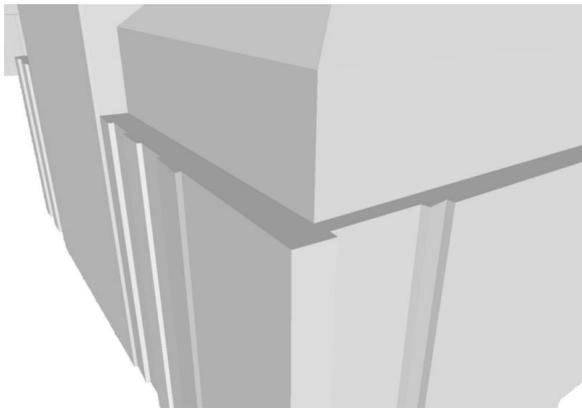


Abb. 4: Teil des originalen Gebäudemodells.

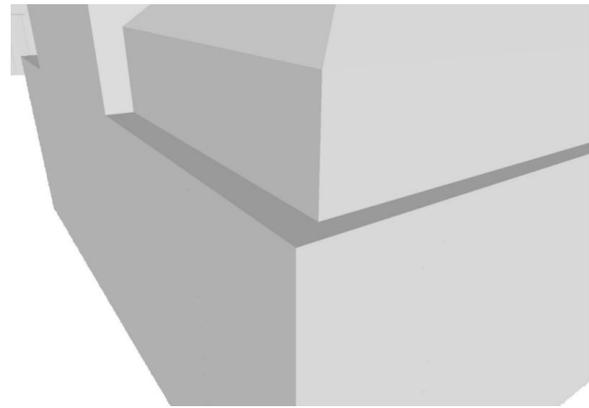


Abb. 5: Teil des generalisierten Gebäudemodells.



Abb. 6: Teil des originalen (texturierten) Gebäudemodells.



Abb. 7: Teil des generalisierten (texturierten) Gebäudemodells.

## 8 Literaturverzeichnis

BALTSAVIAS, E., GRÜN, A. AND VAN GOOL, L., 2001: Automatic Extraction of Man-Made Objects From Aerial and Space Images (III). Swets & Zeitlinger B.V., Lisse, Niederlande.

BARRAULT, M., DUCHENE, C., DEMAZEAU, Y., RUAS, A., 2001: Integrating Multi-Agent, Object-Oriented and Algorithmic Techniques for Improved Automatic Map Generalization. Proceedings of the 20<sup>th</sup> International Cartographic Conference of the ICA, BeiJing, China.

COORS, V., 2001: Feature-preserving Simplification in Web-based 3D-GIS. 1<sup>st</sup> International Symposium on Smart Graphics, 2001, Hawthorne, NY, USA.

GARLAND, M. AND HECKBERT, P., 1997: Surface Simplification using Quadric Error Metrics. Proceedings of ACM SIGGRAPH 97, S. 206-216.

GRÜN, A. AND WANG, X., 2001: News from CyberCity-Modeler. Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (III). Swets & Zeitlinger B.V., Lisse, Niederlande, S. 93-101.

HAALA, N. AND BRENNER, C., 1999: Virtual City Models from Laser Altimeter and 2D Map Data. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 65, no 7, S. 787-795.

HECKBERT, P. AND GARLAND, M., 1997: Survey of Polygonal Simplification Algorithms. Multiresolution Surface Modeling Course, SIGGRAPH 97.

HOPPE, H., 1996: Progressive Meshes. Proceedings of ACM SIGGRAPH 96, S. 325-334.

MAYER, H., 2000: Scale-Space Events for the Generalization of 3D-Building Data Adjustment. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Amsterdam, Niederlande, Vol. XXXIII, Part B4, S. 639-646.

RIBELLES, J., HECKBERT, P., GARLAND, M., STAHOVICH, T., SRIVASTAVA, V., 2001: Finding and Removing Features from Polyhedra, Proceedings of DETC '01, Pittsburgh, Pennsylvania, USA.

ROSSIGNAC, J. AND BORREL, P., 1993: Multi-resolution 3D Approximations for Rendering Complex Scenes. Modeling in Computer Graphics: Methods and Applications, Springer-Verlag, Berlin, S. 455-465.

SESTER, M., 2000: Generalization Based on Least Squares Adjustment. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Amsterdam, Niederlande, Vol. XXXIII, Part B4, S. 931-938.

STAUFENBIEL, W., 1973: Zur Automation der Generalisierung topographischer Karten mit besonderer Berücksichtigung großmaßstäbiger Gebäudedarstellungen, Dissertation, Fachrichtung Vermessungswesen, Universität Hannover.