

3D-Punktwolken als vollwertige 3D-Stadtmodelle?

STEPHAN NEBIKER, SUSANNE BLEISCH¹

Zusammenfassung: In diesem Beitrag diskutieren wir die Nutzung von 3D-Punktwolken als vollwertigen 3D-Stadtmodellierungsansatz. Kern dieses Modellierungsansatzes bilden dichte und semantisch angereicherte 3D-Punktwolken aus primär kinematischen terrestrischen Laserscans. Zuerst werden die bisherigen Ansätze zur 3D-Stadtmodellierung – namentlich die explizite 3D-Geometrie-Modellierung und die bildbasierte Modellierung – zusammengestellt und verglichen. In der Folge werden die Kernpunkte des Punktwolken-Ansatzes vorgestellt und diskutiert. Anschliessend wird aufgezeigt, welche zentrale Rolle virtuellen Globen bzw. webbasierten 3D-Geobrowsern zukommt, um diese 3D-Punktwolken und die darauf basierenden Stadtmodelle breit nutzen zu können. Anhand einer Implementierung in der eigenen Virtuellen Globus-Technologie i3D werden erste Untersuchungen zur technischen Machbarkeit und zu visuellen und kartographischen Grundsatzfragen präsentiert.

1 Einleitung

An der effizienten Generierung realitätsgetreuer 3D-Stadtmodelle wird seit über 15 Jahren geforscht. Der Fokus lag zunächst auf der automatischen 3D-Gebäudeextraktion aus Luftbildern (HAALA & HAHN, 1995), wurde dann erweitert auf luftgestütztes bzw. airborne Laserscanning (ALS) (HAALA & BRENNER, 2001) und auf die Thematik der 3D-Geoinformationssysteme zur Generierung und Verwaltung grosser 3D-Stadtmodelle (NEBIKER, 2003). Aber erst mit der Lancierung von Google Earth in 2005 und Microsoft Virtual Earth (heute Bing Maps 3D) wurden die Möglichkeiten von 3D-Stadtmodellen in einer breiteren Öffentlichkeit wahrgenommen, was neben dem wissenschaftlichen vor allem das kommerzielle Interesse an einer effizienten Generierung von 3D-Stadtmodellen rapide empor schnellen liess. Parallel zu den Aktivitäten im Bereich der 3D-Stadtmodellierung durchlief die Laserscanning-Technologie seit ihrer Lancierung zu Beginn der 1990er-Jahre eine rasante Entwicklung. So erlaubten die erzielbaren Messraten und Punktdichten um das Jahr 2000 erste erfolgreiche Untersuchungen zur 3D-Stadtmodellierung mittels ALS (VOSSELMAN & DIJKMAN, 2001). Mit der Einführung terrestrischer Laserscanner (TLS) in den späten 1990er-Jahren und vor allem von mobilen Scannern (MLS) ca. 5 Jahre später, ist heute auch eine effiziente, genaue und vor allem detaillierte terrestrische 3D-Geometrieerfassung möglich (BARBER et al., 2008).

Mit der rasch zunehmenden Verbreitung von 3D-Stadtmodellen und den neuen technischen Möglichkeiten steigen jedoch auch die Ansprüche und die Anforderungen an die 3D-Stadtmodellierung (NEBIKER et al., in press). So müssen sich 3D-Stadtmodelle vermehrt mit 3D-Modellen aus der Game- und Filmindustrie vergleichen lassen. Gleichzeitig ist die effiziente, automatisierte Ableitung von expliziten 3D-Modellen aus Laserscanning-Punktwolken heute noch ein weitgehend ungelöstes Problem. Eine der grossen Herausforderungen ist es somit,

¹ Stephan Nebiker, Susanne Bleisch: (stephan.nebiker, susanne.bleisch)@fhnw.ch, Institut Vermessung und Geoinformation, Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik, FHNW Fachhochschule Nordwestschweiz, CH-4132 Muttenz

möglichst realitätsgetreue und in vielen Fällen auch detailreiche 3D-Stadtmodelle effizient, kostengünstig und rasch generieren und aktualisieren zu können. In diesem Beitrag werden die aktuellen 3D-Stadtmodellierungsansätze vorgestellt und deren Stärken und Schwächen diskutiert. Anschliessend stellen wir die Nutzung von 3D-Punktwolken als eigenständigen und vollwertigen 3D-Stadtmodellierungsansatz vor, der viele der Schwächen der existierenden Ansätze kompensieren kann.

2 Heutige 3D-Stadtmodellierungsansätze

In der 3D-Stadtmodellierung haben sich zwei unterschiedliche Ansätze etabliert: die explizite *geometrische 3D-Modellierung* und die *bildbasierte Modellierung*. In der Folge werden die wichtigsten Merkmale dieser Modellierungsansätze kurz vorgestellt.

2.1 Geometrische 3D-Modellierung

Bei der geometrischen 3D-Modellierung besteht das Stadtmodell aus einem expliziten geometrischen Modell, das um semantische und Darstellungs-Eigenschaften ergänzt wird (KOLBE et al., 2005). Als geometrisches Basismodell werden dabei vor allem die Randdarstellung (boundary representation bzw. B-Rep) oder Constructive Solid Geometry (CSG) und deutlich weniger häufig Zellmodelle (spatial enumeration) verwendet (Abb. 1) (PFUND, 2001). Bei der verbreiteten 3D-Modellierung mittels B-Rep oder CSG muss das 3D-Stadtmodell zunächst auf der Basis unterschiedlicher Geodaten (primär Luftbilder und ALS, neuerdings auch unter Einbezug von TLS) in einem anspruchsvollen und aufwändigen Prozess konstruiert oder generiert werden, bevor es für Visualisierungs- oder Analysezwecke genutzt werden kann. Eine der wichtigsten Stärken der geometrischen 3D-Stadtmodellierung besteht darin, dass sie auf bewährten Konzepten und Technologien aus der CAD- und GIS-Welt aufbaut und somit durch eine Vielzahl an Tools, Formaten und vermehrt auch Standards wie CityGML (KOLBE et al., 2005) unterstützt wird. Eine weitere Stärke des Ansatzes liegt auf Grund seiner Verbreitung in der grossen Flächendeckung, insbesondere bei wenig detaillierten Objekten.

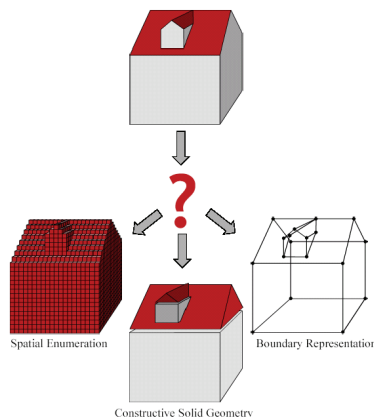


Abb. 1: Geometrische 3D-Modellierung mit geometrischen Basismodellen (PFUND, 2001)

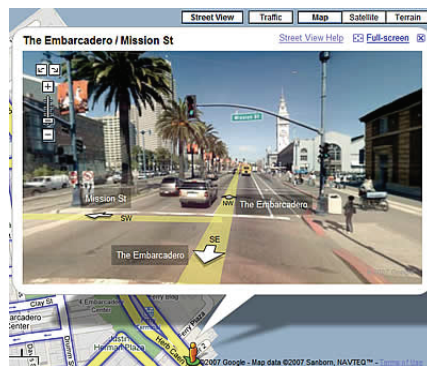


Abb. 2: Bildbasierte Modellierung – georeferenzierte Bildpanoramen (Bsp. Google Street View)

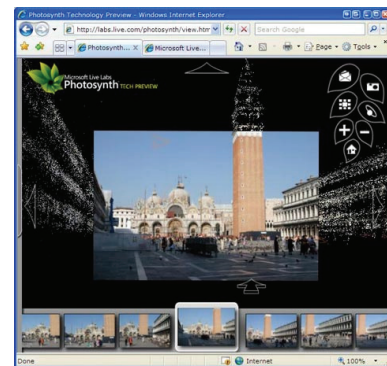


Abb. 3: Bildbasierte Modellierung – georeferenzierte Bildverbände (Bsp. Microsoft Photosynth)

2.2 Bildbasierte Modellierung

Beim bildbasierten Modellierungsansatz wird die Realwelt bzw. der urbane Raum durch georeferenzierte zweidimensionale Bilder oder Videos repräsentiert, anstelle eines expliziten 3D-Modells. Die bildbasierte Stadtmodellierung wurde 2007 mit der Lancierung von Google Street View (Abb. 2) ins öffentliche Interesse gerückt. Erste ähnliche Untersuchungen wie movie-maps (LIPPMAN, 1980), welches eine navigierbare Videofahrt durch Aspen ermöglichte, liegen jedoch bereits 30 Jahre zurück. Währenddem bildbasierte Modellierungsansätze wie Google Street View auf navigierbaren (direkt) georeferenzierten Bildpanoramen beruhen, basiert ein alternativer bildbasierter Modellierungsansatz auf (indirekt) georeferenzierten Bildverbänden. Dieser zweite Ansatz gelangte mit dem Photosynth-Webdienst (Abb. 3) von Microsoft zu einem gewissen Bekanntheitsgrad. Diese zwei Haupttypen der bildbasierten Stadtmodellierung weisen teilweise recht unterschiedliche Eigenschaften auf:

- *Georeferenzierte Bildpanoramen* – Zu den vorteilhaften Eigenschaften dieses Modellierungsansatzes gehört die Möglichkeit einer sehr effizienten fahrzeuggestützten Erfassung mit hohem Detailreichtum und einer robusten, weitgehend automatisierbaren Prozessierung, was eine rasche Erfassung ganzer Städte oder Regionen erlaubt. Zu den Nachteilen gehören die Einschränkung auf die ursprüngliche Erfassungsposition (z.B. 'lock-in' auf Fahrspur des Erfassungsfahrzeug) und die limitierte Navigierbarkeit zwischen den diskreten Panoramen.
- *Georeferenzierte Bildverbände* – Dieser Modellierungsansatz basiert auf der Erfassung und automatischen Co-Registrierung grosser Mengen an 2D-Bilddaten, die anschliessend im 3D-Raum interaktiv betrachtet werden können. Der Ansatz erlaubt den Einbezug eines potentiell fast unerschöpflichen Pools an Laien (crowd-sourcing), was theoretisch eine enorme Skalierbarkeit ermöglicht. Zu den Nachteilen des Ansatzes gehört, dass sich die Erfassung in aller Regel auf (touristisch) interessante Sehenswürdigkeiten beschränkt und dass die resultierenden Bildgeometrien potentiell instabil und ungenau sind.

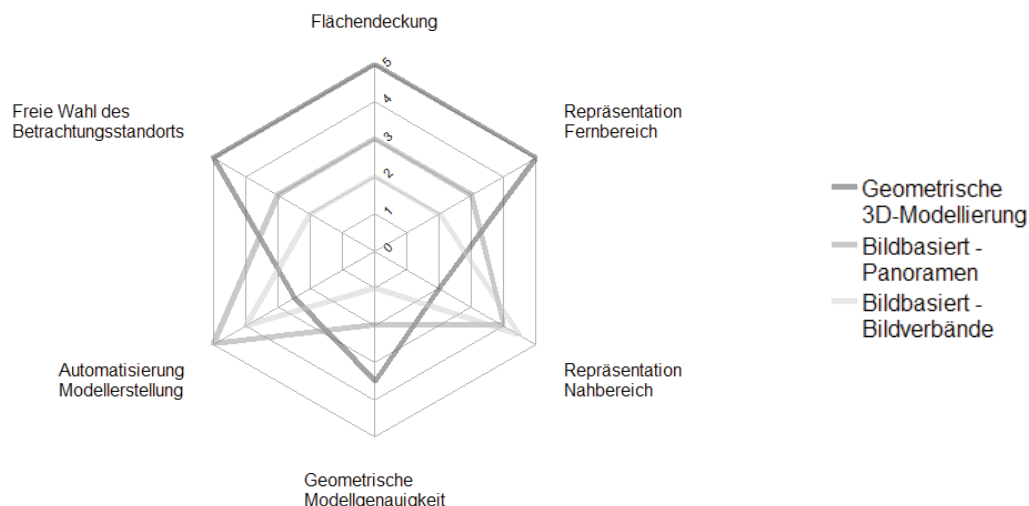


Abb. 4: Vergleich der heutigen 3D-Stadtmodellierungsansätze nach unterschiedlichen Kriterien (0 = keine, 3 = mittlere, 5 = sehr gute Unterstützung)

Wie der Vergleich in Abb. 4 zeigt, weisen die traditionellen Modellierungsansätze, insbesondere die für 3D-Geoinformationsanwendungen massgebende geometrische 3D-Modellierung, neben

vielen Stärken auch einige Defizite auf, namentlich in der wirtschaftlich realisierbaren Modellierung des Nahbereichs (z.B. für typische strassenverkehrsgebundene Anwendungen), in der routinemässig erzielbaren geometrischen Genauigkeit und vor allem in der beschränkten Automatisierbarkeit der Modellgenerierung.

3 3D-Punktwolken als Modellierungsbasis

Eine mögliche Antwort auf die aufgeführten Defizite bietet die Nutzung von 3D-Punktwolken als eigentliche 3D-Stadtmodelle – und nicht bloss als Inputdaten für den geometrischen 3D-Modellierungsprozess, wie dies bis anhin der Fall war. Das Konzept zur Nutzung informationsreicher 3D-Punktwolken (rich point clouds) als vollwertigen 3D-Stadtmodellierungsansatz macht sich zu Nutze, dass zukünftige 3D-Punktwolken eine enorm hohe Dichte aufweisen und über umfassende geometrische, radiometrische und semantische Eigenschaften verfügen werden (NEBIKER et al., in press) (Abb. 5). Beispiele solcher Eigenschaften von Punktwolken bzw. Attribute einzelner Punkte sind: Intensitätswert des reflektierten Laserpulses, RGB-Punkttextur aus ko-registrierten Bildsensoren, 'Punktnormale' aus der Aufnahmegeometrie oder Punktklassifikationen.



Abb. 5: Ausschnitt aus punktwolkenbasiertem 3D-Modell

Punktwolkenbasierte 3D-Stadtmodelle weisen eine Reihe von Vorteilen auf. So können 3D-Punktwolken mittels MLS rasch erfasst und weitgehend automatisch generiert werden, was eine kostengünstige Abdeckung und regelmässige Aktualisierung ganzer Städte und Regionen erlaubt. Da die Datenerfassung bodengestützt – aus einer für Menschen gewohnten Perspektive erfolgt –, erlauben sie eine sehr detaillierte dreidimensionale Abbildung des Nahbereichs und eignen sich ganz besonders für Drive-through- oder Walk-through-Szenarien. Ein weiterer grosser Vorteil ist, dass punktwolkenbasierte 3D-Stadtmodelle als vollautomatisch erzeugte detailreiche graphische 3D-Modelle sofort genutzt werden können, dass jedoch zusätzlich die Möglichkeit besteht, diese auf Grund ihrer reichhaltigen geometrischen und radiometrischen

Eigenschaften sukzessive zu strukturieren und semantisch anzureichern (NEBIKER et al., in press).

Zu den Nachteilen der punktwolkenbasierten 3D-Stadtmodelle gehören die enormen Datenmengen, die sich aus den dichten und informationsreichen 3D-Punktwolken ergeben, der fehlende bzw. leere Hintergrund in 3D-Punktwolken sowie die Beschränkung der Datenerfassung auf die Bereiche entlang von Strassen und Wegen. Die Probleme der Datenmengen und des Hintergrunds liesse sich durch eine Integration der punktwolkenbasierten 3D-Modelle in einen Virtuellen Globus lösen. Das Problem der ungleichen Datenverteilung kann einerseits mit routenbasierten Navigationsmodellen und andererseits durch eine Kombination expliziter geometrischer 3D-Modelle und punktwolkenbasierter Modelle entschärft werden.

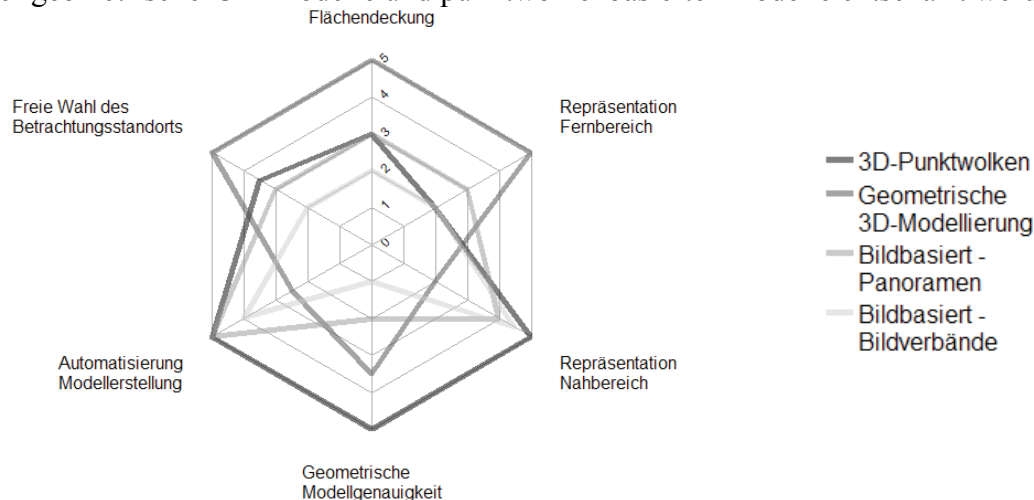


Abb. 6: 3D-Stadtmodellierungsansätze aus Abb. 4 ergänzt um punktwolkenbasierte 3D-Modellierung

4 Virtuelle Globen als Schlüssel zur Nutzung punktwolkenbasierter 3D-Stadtmodelle

4.1 Punktwolkenvisualisierung und Virtuelle Globen

Virtuelle Globen oder webbasierte 3D-Geobrowser könnten eine zentrale Rolle spielen, um riesige 3D-Punktwolken auch ausserhalb heutiger Spezialsoftwarelösungen breit nutzen zu können, und um punktwolkenbasierte 3D-Stadtmodelle zu einer vollwertigen Alternative für heutige 3D-Stadtmodelle zu machen. Die Bedeutung von virtuellen Globen geht somit weit über das Mildern der oben aufgeführten Schwachstellen des Punktwolkenansatzes hinaus.

Die Visualisierung grosser Punktdatenmengen mit Level-of-Detail-Support ist ein sehr aktives Forschungsthema in der Computergrafik mit aktuell zwei vorherrschenden Lösungsansätzen: punktbasiertes Rendering (point-based rendering PBR) und volumenbasiertes Rendering. Eine gute Übersicht über verschiedene PBR-Ansätze und -Implementierungen findet sich in Sainz & Pajarola (2004). In volumenbasierten Ansätzen werden die Originalpunktdaten zuerst in eine volumetrische Repräsentation mit Mehrfachauflösung transformiert (CHRISTEN & NEBIKER, 2010). Ein leistungsfähiger Ansatz auf der Basis eines Sparse Voxel Octrees wird in Crassin et

al. (2009) vorgestellt. Dieser Ansatz erlaubt das Streaming und die performante Visualisierung von Milliarden von Punkten. Einige Autoren, wie bspw. Böhm (2009), haben punktbasierte Visualisierungsansätze erfolgreich auf den Geoinformationsbereich, insbesondere auf die Visualisierung von TLS-Datensätzen angewandt. Wichtige Gründe für die Nutzung Virtueller Globen als Basis für punktwolkenbasierte 3D-Stadtmodelle sind: ein (je nach Implementierung) genaues globales geodätisches Bezugssystem bspw. zur Integration genauer MLS-Punktwolken, effiziente globale räumliche Datenstrukturen und Indizierungsmechanismen, eine LOD-Unterstützung für sämtliche raumbezogenen Inhalte, eine ruckfreie dynamische Visualisierung und – als zentrales Element – eine effiziente streaming-basierte Nutzung sämtlicher Inhalte via Internet durch eine grosse Anzahl an Nutzern (siehe auch Nebiker et al. (in press)).

4.2 Punktwolkensupport in i3D – Implementierung und erste Untersuchungen

Am Institut Vermessung und Geoinformation (IVGI) der FHNW wird mit i3D seit einigen Jahren eine eigene Virtuelle Globus-Technologie entwickelt, welche einerseits als Forschungs- und Entwicklungsplattform dient und andererseits in Projekten mit Industriepartnern zum Einsatz kommt. Die i3D-Technologie ermöglicht die Aufbereitung und die internetbasierte Visualisierung grosser Geodatenmengen mit lokaler bis globaler Ausdehnung. Unterstützt werden Orthobilddaten, Höhendaten, Points of Interest (POI) und 3D-Objekte. Zentrale Elemente von i3D sind ein genaues geodätisches Bezugssystem mit einem ellipsoidischen Rendering-Ansatz auf dem WGS-84-Ellipsoid unter Einbezug eines Geoidmodells und der neu implementierte, voll skalierbare Höhenmodellsupport auf TIN-Basis, welcher eine effiziente Prozessierung riesiger Höhendatensätze und eine optimale Geländerepräsentation inkl. LOD-Unterstützung ermöglicht (CHRISTEN & NEBIKER, 2010). Eine solide geodätische Basis und ein genauer TIN-basierter Höhenansatz sind Voraussetzung für die anvisierten Mixed Reality-Anwendungen in virtuellen Globen (EUGSTER et al., 2010).

Zur Untersuchung der technischen Machbarkeit sowie visueller und kartographischer Grundsatzfragen einer punktwolkenbasierten 3D-Stadtmodellierung wurde in i3D eine Unterstützung für grosse 3D-Punktwolkenmengen implementiert und anhand erster realer Datensätze getestet. Für den Punktwolkensupport in i3D wurden zwei unterschiedliche Ansätze umgesetzt. Eine erste Implementierung verwendete den punktbasierten Rendering-Ansatz. Der neu implementierte Lösungsansatz basiert auf einem Sparse Voxel Octree (CHRISTEN & NEBIKER, 2010). Dabei wird eine Punktwolke in einem Octree gespeichert, wobei jeder Octree-Knoten aus einer 8x8x8 Voxel-Gruppe besteht. Über einen Octocode (analog zum Quadkey) oder über einen „Leveled Voxel Space Index“, einem 3D-Index inklusive Level, ist ein direkter Zugriff auf eine Partition im 3D-Raum und den gewünschten Level of Detail möglich.

Für die ersten Untersuchungen standen die folgenden Testdaten zur Verfügung: eine 3D-Landschaftsmodell des FHNW Campus bestehend aus einem Höhenmodell mit Sub-Meter-Genauigkeit, Orthobilddaten mit einer GSD von ca. 50 cm und 3D-Gebäudemodelle des Campus mit photorealistischen Texturen aus Schrägluftbildern (vgl. Abb. 7). Da zum Zeitpunkt der Untersuchungen keine Punktwolken mit NIR- und RGB-Punkttexturen aus einem mobilen Laserscan zur Verfügung standen, wurde die MLS-Aufnahme mittels mehrerer TLS-Aufnahmen

entlang des Strassenraums substituiert. Diese TLS-Aufnahmen wiesen eine zu MLS vergleichbare Punktdichte von 1-3 cm im Strassenraum und 5-10 cm im Bereich der umliegenden Gebäude auf. Abb. 8 zeigt das Punktwolkenmodell für den identischen Ausschnitt wie Abb. 7 und illustriert die massiv verbesserte Repräsentation des Nahbereichs mit den unzähligen Objekten wie Vegetation, Beleuchtungskandelaber und Verkehrssignale, die den Raumeindruck massgeblich prägen.



Abb. 7: Geometrische 3D-Modellierung des FHNW-Campus mit ausgewählten texturierten 3D-Objekten integriert in virtuellen Globus i3D



Abb. 8: 3D-Punktwolken-Modell des identischen Ausschnitts mit hoher Punktdichte und mit RGB-Texturen aus ko-registrierten Bilddaten

5 Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag haben wir einen Ansatz zur 3D-Stadtmodellierung auf der Basis dichter und informationsreicher 3D-Punktwolken vorgestellt. Es wurde gezeigt, dass traditionelle Ansätze zur 3D-Stadtmodellierung Defizite aufweisen, namentlich im Bereich der realitätsgetreuen Modellierung des Nahbereichs und in der beschränkten Automatisierbarkeit der 3D-Modellgenerierung, die durch den neuen Ansatz behoben werden können. Zu den wichtigsten Stärken der punktwolkenbasierten 3D-Stadtmodellierung gehören:

- eine genaue und detailreiche Erfassung des Nahbereichs
- eine rasche 3D-Datenerfassung mittels MLS aus einer nutzer-ähnlichen Perspektive
- eine weitgehend automatisierte Datenprozessierung und Modellgenerierung
- die Möglichkeit zur sofortigen Nutzung eines einfachen graphischen 3D-Modells
- die Möglichkeit zur bedarfsweisen, sukzessiven semantischen Anreicherung des Modells

Es wurde auch aufgezeigt, dass für eine breite Nutzung von 3D-Punktwolken – über einen engen Kreis von LiDAR-Fachleuten hinaus – geeignete streamingfähige Technologien erforderlich sind und dass Virtuelle Globen ideale Voraussetzungen mitbringen, um diese Anforderungen zu erfüllen. Mit einer ersten Implementierung im Virtuellen Globus i3D konnte nicht nur die technische Machbarkeit bewiesen werden, es konnte auch aufgezeigt werden, dass die Integration punktwolkenbasierter 3D-Stadtmodelle graphisch ansprechend ist und einen deutlichen Informationsgewinn bietet. Eine ausführlichere Betrachtung findet sich in Nebiker et al. (in press).

Die punktwolkenbasierte 3D-Stadtmodellierung wirft jedoch auch zahlreiche neue Fragen auf. Zu den vielen offenen Fragen und Herausforderungen gehören die optimale Texturierung von 3D-Punktwolken, die Filterung unerwünschter Objekte (z.B. von Fahrzeugen im Fahrbahnbereich) sowie etwa geeignete Datenstrukturen und Algorithmen zur semantischen Anreicherung punktwolkenbasierter 3D-Stadtmodelle direkt im Virtuellen Globus.

6 Literaturverzeichnis

- BARBER, D. et al., 2008: Geometric validation of a ground-based mobile laser scanning system. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **63**(1): 128-141.
- BÖHM, J., 2009. Terrestrial LiDAR in Urban Data Acquisition. In: D. Fritsch (Editor), *Photogrammetric Week 2009*. Wichmann, pp. 169-178.
- CHRISTEN, M. & NEBIKER, S., 2010: Neue Entwicklungen im Bereich Virtueller Globen am Beispiel der i3D-Technologie. – Dreiländertagung der OVG, DGPF und SGPF, Wien.
- CRASSIN, C. et al., 2009: GigaVoxels: ray-guided streaming for efficient and detailed voxel rendering. – *Proceedings of the 2009 symposium on Interactive 3D graphics and games*. ACM, Boston, Massachusetts.
- EUGSTER, H. et al., 2010: Drohnenbasierte Umweltbeobachtung und Kartierung basierend auf einem Virtuellen Globus. – Dreiländertagung der OVG, DGPF und SGPF, Wien.
- HAALA, N. & BRENNER, C., 2001: City model data acquisition from laser scanning, OEEPE/ISPRS-Workshop 'From 2D to 3D - Establishment and Maintenance of National Core Geospatial Databases, Hannover.
- HAALA, N. & HAHN, M., 1995. Data fusion for the detection and reconstruction of buildings, Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images. Birkhäuser Verlag, Basel, pp. 211-220.
- KOLBE, T.H. et al., 2005. CityGML – Interoperable Access to 3D City Models. In: P.v. Oosterom, S. Zlatanova and E.M. Fendel (Editors), *Proceedings of the Int. Symposium on Geo-Information for Disaster Management on 21-23 March 2005 in Delft*. Springer Verlag.
- LIPPMAN, A., 1980: Movie-maps: An application of the optical videodisc to computer graphics. – *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* **14**(3): 32-42.
- NEBIKER, S., 2003. DILAS - The Digital Landscape Server for the Generation and Management of Large 3D City Models. In: D. Fritsch (Editor), *Photogrammetric Week '03*. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 227-236.
- NEBIKER, S. et al., in press: Rich point clouds in virtual globes – A new paradigm in city modeling? – *Computers, Environment and Urban Systems*: doi:10.1016/j.compenvurbsys.2010.05.002.
- PFUND, M., 2001: Topological Data Structure for a 3D GIS. – Italy-Canada Workshop on 3D Digital imaging and modeling, applications of heritage, industry, medicine & land., Padova, Italy, 3.-4. April 2001.
- SAINZ, M. & PAJAROLA, R., 2004: Point-based rendering techniques. – *Computers & Graphics*, **28**(6): 869-879.
- VOSSELMAN, G. & DIJKMAN, S., 2001: 3D Building Model Reconstruction from Point Clouds and Ground Plans. – *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume XXXIV-3/W4 Annapolis, MD, 22-24 Oct. 2001.