

# Echtzeit-Rendering-Techniken für 3D-Punktwolken basierend auf semantischen und topologischen Attributen

SÖREN DISCHER<sup>1</sup>, RICO RICHTER<sup>1</sup> & JÜRGEN DÖLLNER<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: 3D-Punktwolken, die mittels LiDAR oder photogrammetrischen Verfahren effizient erzeugt werden können, stellen im Kontext von Geoinformationssystemen eine essentielle Kategorie von Geodaten dar. Echtzeitfähige Rendering-Techniken für 3D-Punktwolken ermöglichen deren interaktive Darstellung und Erkundung. In diesem Beitrag wird gezeigt, wie semantische Informationen, die eine Zuordnung der Punkte zu Bebauung, Gelände und Vegetation ermöglichen, mit topologischen Informationen kombiniert werden können, um das Erscheinungsbild von 3D-Punktwolken aufgaben- und anwendungsfall-spezifisch zu optimieren. Das vorgestellte neuartige Renderingverfahren ermöglicht es, verschiedene Darstellungsstile für unterschiedliche Punktkategorien zur Laufzeit anzupassen. Das kategoriebasierte Rendering erleichtert die Hervorhebung und damit das Erkennen von einzelnen Strukturen und Objekten; sie wird mit Techniken zur Fokus-&-Kontext-Visualisierung dynamisch umgesetzt. Somit wird es Nutzern erleichtert, die Struktur, den Aufbau und den Gesamtkontext des durch eine 3D-Punktwolke repräsentierten Gebietes zu erfassen, zu analysieren und zu explorieren.*

## 1. Einleitung und Problemstellung

Flugzeuggestützte und terrestrische Erfassungen auf Grundlage von LiDAR-Technologie oder photogrammetrischer Verfahren ermöglichen die automatisierte, effiziente und kostengünstige Erzeugung von massiven 3D-Punktwolken (LEBERL et al. 2010). Hierbei handelt es sich um punktbasierte, digitale Modelle real-weltlicher Objekte und deren Oberflächen –z. B. einzelne Gebäude und Straßenzüge oder ganze Städte und Landschaften– (LAFARGE & MALLET 2012), welche die Datengrundlage für eine Vielzahl von Anwendungen aus unterschiedlichen Bereichen darstellen, wie z. B. dem Katastrophenschutz bzw. -management (JABOYEDOFF et al. 2012), der Umweltüberwachung (GOBAKKEN et al. 2012) oder der Stadtplanung (SERNA & MARCOTEGUI 2013). Eine wesentliche Herausforderung bei der Verarbeitung, Analyse und Visualisierung von 3D-Punktwolken besteht in der Handhabung des üblicherweise extrem hohen Datenaufkommens (z. B. bis zu ein Petabyte für eine Metropolregion), das durch regelmäßige Erfassungen (z. B. jährlich, monatlich) sowie immer höhere Genauigkeiten und Abtastdichten (z. B. 400 Punkte/m<sup>2</sup>) hervorgerufen wird (NEBIKER ET AL. 2010). Die effiziente Prozessierung und Visualisierung massiver 3D-Punktwolken erfordert daher die Verwendung von Out-of-Core-Verfahren, die auf effizienten räumlichen Datenstrukturen basieren und verschiedene Caching-Strategien umsetzen, um für beliebige Hardwarekonfigurationen zu skalieren (DISCHER ET AL. 2014). So nutzen Visualisierungssysteme für das Echtzeit-Rendering von 3D-Punktwolken in der Regel Quadrees, Octrees oder Kd-Trees in Kombination mit Level-of-Detail-Konzepten (RICHTER et al. 2015, GOSWAMI et al. 2013, WIMMER & SCHEIBLAUER 2006, GOBBETTI & MARTON 2004).

---

<sup>1</sup> Hasso-Plattner-Institut, Prof.-Dr.-Helmert-Straße 2-3, 14482 Potsdam;  
E-Mail: [soeren.discher, rico.richter, juergen.doellner]@hpi.de



Abb. 1: (links) - 3D-Punktwolke einer Befliegung dargestellt mit Luftbildfarben und einem einheitlichen Darstellungsstil. (rechts) - Darstellung derselben 3D-Punktwolke unter Berücksichtigung semantischer Attribute: Gebäudefassaden erscheinen als geschlossene Oberflächen, Tiefenunterschiede zwischen benachbarten Punkten können besser abgeschätzt und einzelne Strukturen leichter identifiziert werden. (Vgl. RICHTER ET AL. 2015)

Diese Visualisierungssysteme verwenden in der Regel einen einheitlichen Darstellungsstil für alle Punkte.

In unserem Ansatz gehen wir davon aus, dass die Punkte einer 3D-Punktwolke grundsätzlich unterschiedlichen Oberflächenkategorien wie Vegetation, Gebäude, Gelände, Straßen oder Gewässer zugeordnet werden können. Jede dieser Oberflächenkategorien hat jedoch unterschiedliche strukturelle Eigenschaften (z. B. Dichte, Planarität), sodass der durch einen einheitlichen Darstellungsstil erzielbare Informationsgewinn –bezogen auf die Differenzierung und Wahrnehmung von Strukturen und Objekten– häufig begrenzt ist (RICHTER et al. 2015). Beispielsweise werden Oberflächen mitunter nur ungleichmäßig und lückenhaft erfasst (z. B. Gebäudefassaden in flugzeuggestützten Scans), was die Wahrnehmung von benachbarten Punkten als zusammenhängende Oberflächen sowie die korrekte Abschätzung von Tiefenunterschieden erschweren kann. Da sich die einzelnen Punkte zudem stark ähneln und nur anhand ihrer Farbwerte unterscheiden –die sich etwa auf Basis von Luftbildern des entsprechenden Oberflächenbereichs bestimmen lassen– ist die Identifikation von einzelnen Strukturen und Objekten, die beispielsweise als Orientierungspunkte dienen können (z. B. Gebäude, Straßen), oft nicht zweifelsfrei möglich (Abb. 1 (links)).

In dieser Arbeit wird beschrieben, wie sich die Visualisierung von 3D-Punktwolken durch die Berücksichtigung *semantischer* und *topologischer* Attribute verbessern lässt. Topologische Attribute beschreiben die Struktur bzw. Topologie einer 3D-Punktwolke (z. B. lokale Maxima oder die Normalenverteilung in der lokalen Punktumgebung). Semantische Attribute ermöglichen die punktweise Unterscheidung verschiedener Oberflächenkategorien und können im Rahmen einer Vorverarbeitung durch Auswertung der topologischen Attribute ermittelt werden (RICHTER et al. 2013, CARLBERG et al. 2009, LODHA et al. 2007). Das vorgestellte neuartige Renderingverfahren ermöglicht es, semantische und topologische Attribute zu nutzen, um den Darstellungsstil jedes Punkts individuell anzupassen. So können kategorieabhängig verschiedene photorealistische und nicht-photorealistische Rendering-Techniken angewendet werden, die jeweils unterschiedliche Charakteristika hervorheben. Beispielsweise eignet sich eine volumenhafte Darstellung für Vegetationsobjekte, während Gebäudefassaden möglichst als

geschlossene Oberflächen (GAO et al. 2012) visualisiert werden sollten. Die entwickelten Rendering-Techniken lassen sich zur Laufzeit pro Oberflächenkategorie und entsprechend der Nutzeranforderungen hinsichtlich Größe, Farbgebung oder Ausrichtung der einzelnen Punkte konfigurieren (Abb. 1 (rechts)). Das vorgestellte Renderingverfahren ermöglicht zudem die dynamische Einbindung verschiedener Techniken zur Fokus-&-Kontext-Visualisierung, beispielsweise durch statische oder interaktive Linsen (VAARANIEMI et al. 2013, TRAPP et al. 2008). Somit lassen sich je nach Anwendungsfall relevante Objekte oder Strukturen gezielt im Bild hervorheben, auch wenn diese verdeckt wären.

## 2. Punktbasierte Echtzeit-Rendering-Techniken

Im Rahmen der Arbeit wurden verschiedene grundlegende echtzeitfähige Rendering-Techniken zur Darstellung von Punkten aus 3D-Punktwolken entwickelt. Diese Techniken umfassen (Abb. 2):

- **Pixelbasierte Darstellung.** Punkte werden durch quadratische oder kreisförmige computergrafische Primitive dargestellt, die stets entlang der Blickrichtung ausgerichtet sind und eine konstante, in Bildschirmpixeln definierte Größe aufweisen (SHREINER et al. 2013). Je nach Betrachtungsposition überlagern sich benachbarte Punkte oder die 3D-Punktwolke erscheint lückenhaft.
- **Splat-basierte Darstellung.** Splats (BOTSCH et al. 2005, ZWICKER et al. 2001) sind kreisförmige Repräsentationen von Punkten, die entlang einer beliebigen Achse ausgerichtet sein können und deren Größe abhängig von der Betrachtungsposition perspektivisch korrekt skaliert wird. Sie verhindern somit Überlagerungen oder das Auftreten von Lücken bei veränderter Betrachtungsposition.
- **Nicht-photorealistische Darstellung.** Als Erweiterung der Splat-basierten Darstellung, können die Silhouetten der Splats nachgezeichnet werden (XU et al. 2004). Tiefenunterschiede zwischen benachbarten Splats werden betont, sodass beispielsweise feingranulare Strukturen auf Dächern leichter wahrgenommen werden können.
- **Volumenhafte Darstellung.** Bei diesem Ansatz werden die Punkte in Form von Kugeln anstelle von flachen Kreisen repräsentiert (RICHTER et al. 2015). Diese dreidimensionale Darstellung eignet sich insbesondere für geometrisch komplexe Oberflächen wie Vegetationsobjekte.
- **Solide Darstellung.** Dieser Ansatz wurde für die Darstellung von Gebäudefassaden entwickelt, die meist nur lückenhaft erfasst wurden, aber dennoch als geschlossene Oberflächen visualisiert werden sollen. Fassaden werden auf Basis der vorhandenen Dachpunkte approximiert.

Abhängig von der angewandten Rendering-Technik lassen sich zudem die Ausrichtung, die Größe und die Farbgebung (z. B. Luftbildfarben, uniforme Farbe pro Oberflächenkategorie, Farbverlauf in Abhängigkeit topologischer Attribute) der einzelnen Punkte konfigurieren. Dadurch ergeben sich weitere Freiheitsgrade für die aufgaben- oder anwendungsspezifische Visualisierung.

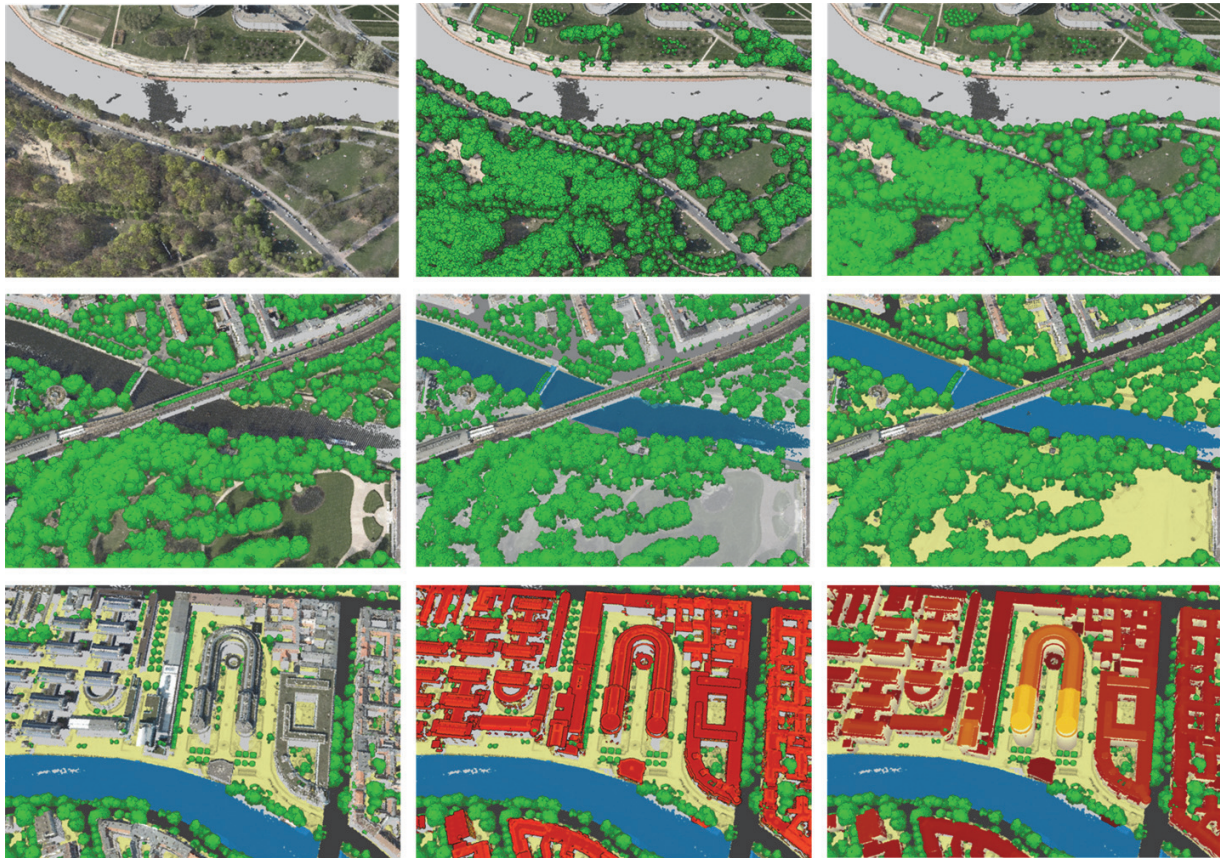


Abb. 2: Visualisierung verschiedener Oberflächenkategorien unter Verwendung unterschiedlicher Darstellungsstile: (oben) - Splat-basierte, volumenhafte und nicht-photorealistische Darstellung von Vegetationspunkten. (mitte) Einfärbung von Geländepunkten mit Luftbildfarben anhand von topologischen Attributen oder durch Kombination von beiden Varianten. (unten) - Splat-basierte, nicht-photorealistische und solide Darstellung von Gebäudepunkten. Die Erfassung von Struktur, Aufbau und Gesamtkontext der durch die 3D-Punktwolke repräsentierten Oberfläche wird somit erleichtert.

### 3. Fokus-&-Kontext-Visualisierung

Techniken zur Fokus-&-Kontext-Visualisierung (VAARANIEMI et al. 2013, TRAPP et al. 2008) ermöglichen es, Oberflächen gezielt hervorzuheben um Nutzern die Orientierung zu erleichtern sowie verdeckte Objekte sichtbar zu machen. Hierbei kann zwischen den folgenden Anwendungsfällen unterschieden werden:

- **Hervorhebung teilweise verdeckter Objekte.** Werden Oberflächen, die aus Nutzer- oder Anwendungssicht von besonderem Interesse sind, *teilweise* verdeckt –ist also ihre grundlegende Position eindeutig, ihre detaillierte Ausprägung aber unbekannt– ist die Verwendung von interaktiven Fokus-&-Kontext-Linsen sinnvoll (Abb. 3 (oben)). Bei dieser Technik wird ein Bereich festgelegt, in dem bestimmte Oberflächenkategorien vollständig ausgeblendet werden (z. B. Gebäude oder Vegetationsobjekte, die den Verlauf einer Straße

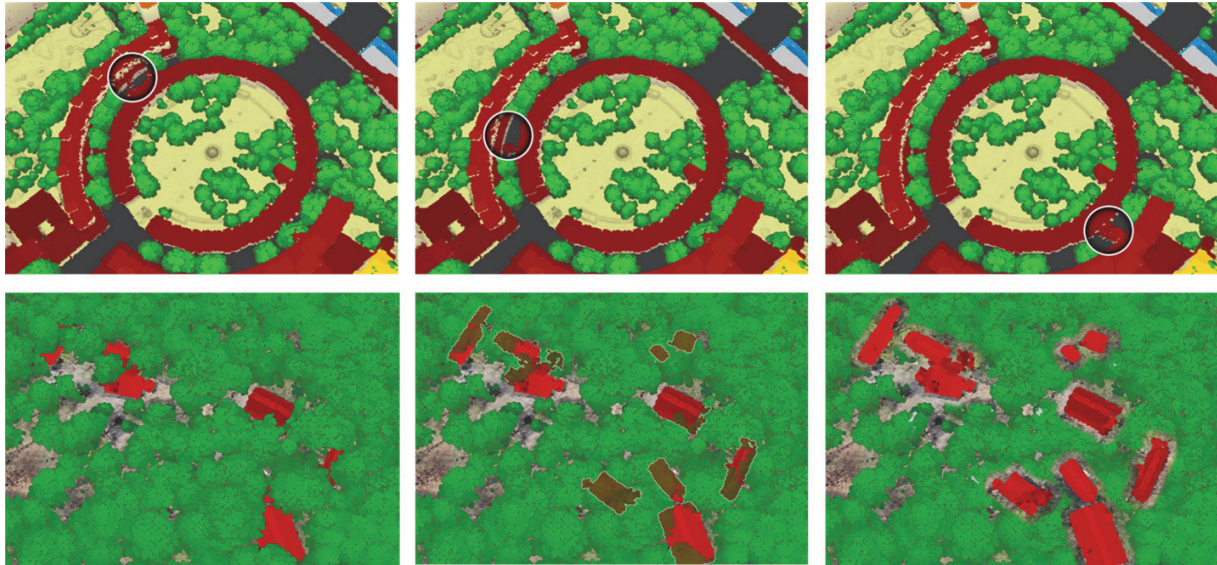


Abb. 3: (oben) - Hervorhebung des teilweise verdeckten Verlaufs einer Straße mittels interaktiver Fokus-&-Kontext-Linsen. (unten) - Hervorhebung teilweise oder vollständig von Vegetation verdeckter Gebäude mittels statischer Fokus-&-Kontext-Linsen (rechts) oder Nachzeichen der verdeckten Bereiche (mitte).

verdecken). Größe und Position dieses Linsenbereichs können dynamisch durch den Nutzer angepasst werden.

- **Hervorhebung vollständig verdeckter Objekte.** Werden Oberflächen, die aus Nutzer- oder Anwendungssicht von besonderem Interesse sind, vollständig verdeckt (z. B. Gebäude in Waldgebieten), sind interaktive Fokus-&-Kontext-Linsen ungeeignet, da die manuelle Konfiguration des Linsenbereichs Vorwissen über die Position der hervorzuhebenden Objekte erfordert. Vielmehr müssen Rendering-Techniken genutzt werden, die Bereiche, in denen bestimmte Oberflächenkategorien ausgeblendet werden sollen, automatisch erkennen (Abb. 3 (unten)). Beispielhaft hierfür sind statische Fokus-&-Kontext-Linsen, die einen Halo-artigen Umkreis um relevante Objekte erzeugen.

Analog zu den vorgestellten Rendering-Techniken zur Darstellung einzelner Oberflächenkategorien, kann auch die Fokus-&-Kontext-Visualisierung dynamisch konfiguriert und pro Oberflächenkategorie selektiv angewendet werden.

## 4. Evaluation

Die Evaluation des vorgestellten Renderingverfahrens sowie der einzelnen Rendering-Techniken erfolgte auf Grundlage zwei unterschiedlich hoch aufgelöster 3D-Punktwolken des Berliner Stadtgebiets aus den Jahren 2008 bzw. 2013, die durch eine flugzeuggestützte Erfassung generiert wurde. Der Datensatz von 2008 weist eine Punktdichte von 7 – 10 Punkten/m<sup>2</sup>, ca. 5 Milliarden Punkte und einen Speicherbedarf von 112 Gigabyte auf. Die Punktdichte der 3D-Punktwolke von 2013 entspricht 100 Punkten/m<sup>2</sup> bei einer Gesamtpunktzahl von 80 Milliarden

Punkten und einem Speicherbedarf von 1.788 Gigabyte. Das Testsystem verfügte über eine Intel Xeon CPU mit 3.20 GHz, 12 Gigabyte Hauptspeicher und eine NVIDIA GeForce GTX 770 Grafikkarte mit 2 Gigabyte Grafikspeicher. Ein Out-of-Core-Rendering-Verfahren für 3D-Punktwolken (RICHTER et al. 2015) ermittelt die für die Bildsynthese notwendigen Punkte, die sich im Sichtfeld des Betrachters befinden. Die erforderliche Punktdichte wird adaptiv in Abhängigkeit zur Entfernung zwischen Betrachter und Oberfläche bestimmt. Basierend auf der Interaktion des Nutzers und der Kombination der Rendering-Techniken werden vom Out-of-Core-Rendering-Verfahren zwischen 2 und 4 Millionen Punkte pro Frame gerendert. Die durchgeführte Evaluierung mit den Testdatensätzen hat belegt, dass eine interaktive Visualisierung für beliebig große 3D-Punktwolken mit allen vorgestellten Rendering-Techniken möglich ist (Tab. 1).

Tab. 1: Durchschnittliche Renderingperformance der vorgestellten Rendering-Techniken in frames per second (fps) bei steigenden Datenmengen. Im Testdurchlauf „Kombination“ wurden mehrere Rendering-Techniken (solide, splat-basierte, volumenhafte Darstellung) miteinander kombiniert (Abb. 2 (unten rechts)).

	1 Mio. Punkte	3 Mio. Punkte	6 Mio. Punkte
Pixelbasierte Darstellung	195,63	72,60	36,15
Splat-basierte Darstellung	110,84	39,13	21,48
Volumenhafte Darstellung	108,04	36,67	20,97
Nicht-photorealistische Darstellung	107,51	34,46	20,55
Solide Darstellung	59,98	24,12	11,83
Kombination	73,81	28,43	15,63

## 5. Fazit und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein neuartiges Renderingverfahren zur interaktiven Visualisierung von 3D-Punktwolken vorgestellt, das semantische und topologische Attribute berücksichtigt um den Darstellungsstil der Punkte auf Basis semantischer und topologischer Attribute anzupassen. Zur Darstellung der Punkte können unterschiedliche photorealistische und nicht-photorealistische Rendering-Techniken genutzt werden. Die Auswahl und Konfiguration der verwendeten Rendering-Techniken erfolgt für jede Oberflächenkategorie separat. Durch die Integration verschiedener Techniken zur Fokus-&-Kontext-Visualisierung können Punkte, die für den jeweiligen Anwendungsfall besonders relevante Oberflächenkategorien repräsentieren, gezielt hervorgehoben werden. Das vorgestellte Renderingverfahren erleichtert es Nutzern, die Struktur, den Aufbau und den Gesamtkontext des durch eine 3D-Punktwolke repräsentierten Gebietes visuell zu erfassen und gezielter interaktiv zu explorieren.

Die Praxistauglichkeit des Renderingverfahrens und dessen Kombinierbarkeit mit gängigen Out-of-Core-Verfahren zur Visualisierung massiver 3D-Punktwolken wurden anhand real-weltlicher Datensätze nachgewiesen. Ein zukünftiger Forschungsschwerpunkt ist die Entwicklung neuer Rendering-Techniken zur verbesserten Darstellung von Oberflächenkategorien wie Gewässern (SEMMO et al. 2013), Straßen (NIENHAUS et al. 2007) oder Stadtmöbeln.

## 6. Danksagung

Dieses Forschungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und ist Teil der InnoProfile Transfer Nachwuchsforschergruppe "4DnD-Vis" und der Research School für "Service-Oriented Systems Engineering" am Hasso-Plattner-Institut. Die verwendeten Daten wurden von der Fa. virtualcitySYSTEMS sowie der Berlin Partner für Wirtschaft und Technologie GmbH bereitgestellt.

## 7. Literaturverzeichnis

- BOTSCH, M., HORNING, A., ZWICKER, M. & KOBELT, L., 2005: High-quality surface splatting on today's GPUs. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Eurographics Symposium on Point-Based Graphics, S. 17-24.
- CARLBERG, M., GAO, P., CHEN, G. & ZAKHOR, A., 2009: Classifying Urban Landscape in Aerial Lidar using 3d Shape Analysis. Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Image Processing, S. 1681-1684.
- DISCHER, S., RICHTER, R. & DÖLLNER, J., 2014: Konzepte für eine Service-basierte Systemarchitektur zur Integration, Prozessierung und Analyse von massiven 3D-Punktwolken. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band 23, Seyfert, E., Gülch, E., Heipke, C., Schiewe, J. & Sester, M. (Hrsg.), 34. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, 26.-28. März 2014 an der HafenCity Universität Hamburg, Tagungsband auf CD-ROM, Beitrag 224.
- GOBAKKEN, T., NÆSSET, E., NELSON, R., BOLLANDSÅS, O. M., GREGOIRE, T. G., STÄHL, G., HOLM, S., ØRKA, H. O. & ASTRUP, R., 2012: Estimating biomass in Hedmark County, Norway using national forest inventory field plots and airborne laser scanning. Remote Sensing of Environment **123**, S. 443-456.
- GAO, Z., NOCERA, L. & NEUMANN, U., 2012: Visually-complete aerial LiDAR point cloud rendering. Proceedings of the 20<sup>th</sup> International Conference on Advances in Geographic Information Systems, S. 289-298.
- GOBBETTI, E. & MARTON, F., 2004: Layered point clouds: a simple and efficient multiresolution structure for distributing and rendering gigantic point-sampled models. Computers & Graphics **28** (6), S. 815-826.
- GOSWAMI, P., EROL, F., MUKHI, R., PAJAROLA, R. & GOBBETTI, E., 2013: An efficient multiresolution framework for high quality interactive rendering of massive point clouds using multi-way kd-trees. The Visual Computer **29** (1), S. 69-83.
- JABOYEDOFF, M., OPIKOFER, T., ABELLÁN, A., DERRON, M. H., LOYE, A., METZGER, R. & PEDRAZZINI, A., 2012: Use of LIDAR in landslide investigations: a review. Natural Hazards **61** (1), S. 5-28.
- LAFARGE, F. & MALLET, C., 2012: Creating Large-Scale City Models from 3D-Point Clouds: A Robust Approach with Hybrid Representation. International Journal of Computer Vision **99** (1), S. 69-85.
- LEBERL, F., IRSCHARA, A., POCK, T., MEIXNER, P., GRUBER, M., SCHOLZ, S. & WIECHERT, A., 2010: Point Clouds: Lidar versus 3D Vision. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing **76** (10), S. 1123-1134.

- LODHA, S. K., FITZPATRICK, D. M. & HELMBOLD, D. P., 2007: Aerial Lidar Data Classification using AdaBoost. Proceedings of the Sixth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, S. 1123-1134.
- NEBIKER, S., BLEISCH, S. & CHRISTEN, M., 2010: Rich point clouds in virtual globes – A new paradigm in city modeling? Computers, Environment and Urban Systems **34** (6), S. 508-517.
- NIENHAUS, M., GOOCH, B. & DÖLLNER, J., 2007: Light Threads – Illustrating Movement Dynamics in City Models. Proceedings of the ACM SIGGRAPH 2007 – Sketch Program, S. 1:1
- RICHTER, R., BEHRENS, M. & DÖLLNER, J., 2013: Object class segmentation of massive 3D point clouds of urban areas using point cloud topology. International Journal of Remote Sensing **34** (23), S. 8408-8424.
- RICHTER, R., DISCHER, S. & DÖLLNER, J., 2015: Out-of-Core Visualization of Classified 3D Point Clouds. 3D Geoinformation Science: The Selected Papers of the 3D GeoInfo 2014, S. 227-244.
- SHREINER, D., SELLERS, G., KESSENICH, J. M. & LICEA-KANE, B. M., 2013: OpenGL Programming Guide: The Official Guide to Learning OpenGL, Version 4.3, 8<sup>th</sup> Edn. Addison-Wesley
- SEMMO, A., KYPRIANIDIS, J. E., TRAPP, M. & DÖLLNER, J., 2013: Real-time rendering of water surfaces with cartography-oriented design. Proceedings of the Symposium on Computational Aesthetics, S. 5–14.
- SERNA, A. & MARCOTEGUI, B., 2013: Urban accessibility diagnosis from mobile laser scanning data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing **84**, S. 23–32.
- TRAPP, M., GLANDER, T., BUCHHOLZ, H. & DÖLLNER, J., 2008: 3D Generalization Lenses for Interactive Focus + Context Visualization of Virtual City Models. Proceedings of the 12<sup>th</sup> Conference on Information Visualization, S. 356–361
- VAARANIEMI, M., FREIDANK, M. & WESTERMANN, R., 2013: Enhancing the Visibility of Labels in 3D Navigation Maps. Progress and New Trends in 3D Geoinformation Sciences, S. 23-40.
- WIMMER, M. & SCHEIBLAUER, C., 2006: Instant points: Fast rendering of unprocessed point clouds. Proceedings of the Eurographics Symposium on Point-Based Graphics, S. 129–137
- XU, H., NGUYEN, M. X., YUAN, X. & CHEN, B., 2004: Interactive Silhouette Rendering for Point-Based Models. Proceedings of the 1<sup>st</sup> Eurographics Symposium on Point-Based Graphics, S. 13-18.
- ZWICKER, M., PFISTER, H., VAN BAAR, J. & GROSS, M. H., 2001: Surface splatting. Proceedings of the 28<sup>th</sup> annual conference on Computer graphics and interactive techniques, S. 371-378.